

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FRANCIELE ALBA DA SILVA

COMPETIÇÃO E ESTIMATIVAS DENDROMÉTRICAS PARA CLONES DE
EUCALIPTO EM DELINEAMENTOS SISTEMÁTICOS DE NELDER

CURITIBA

2019

FRANCIELE ALBA DA SILVA

COMPETIÇÃO E ESTIMATIVAS DENDROMÉTRICAS PARA CLONES DE
EUCALIPTO EM DELINEAMENTOS SISTEMÁTICOS DE NELDER

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração de Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Behling

CURITIBA
2019

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Silva, Franciele Alba da

Competição e estimativas dendrométricas para clones de eucalipto em
delineamentos sistemáticos de Nelder / Franciele Alba da Silva. –
Curitiba, 2019.
126 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Behling

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
Defesa: Curitiba, 28/02/2019. Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Árvores - Medição. 2. Dendrometria - Amostragem. 3. Eucalipto -
Espaçamento. 4. Árvores - Crescimento. 5. Análise multivariada. 6. Teses.
I. Péllico Netto, Sylvio. II. Behling, Alexandre. III. Universidade Federal do
Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.53

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **FRANCIELE ALBA DA SILVA** intitulada: **Competição e estimativas dendrométricas para clones de eucalipto em delineamentos sistemáticos de Nelder**, após terem inquirido a autora e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2019.


SYLVIO PÉLLICO NETTO
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


DENISE JETON CARDOSO
Avaliador Externo (EMBRAPA)


ALLAN LIBANIO PELISSARI
Avaliador Interno (UFPR)



Dedico aos meus pais Kika e Aldo e ao meu irmão Álvaro, por serem luz em dias escuros.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me permitir essa conquista, por me guiar pelos bons caminhos, e por sempre me proteger.

Ao meu orientador Professor Dr. Sylvio Péllico Netto, pela oportunidade, orientação e pelo ensinamento transmitido.

Ao Professor Dr. Alexandre Behling, meu co-orientador e amigo, pelo incentivo mesmo antes de ter ingressado no mestrado, por toda ajuda e compreensão.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de estudo.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

A Empresa Eco Brasil Florestas e a Empresa Brasil Florestal, por disponibilizarem os dados para realização da pesquisa.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Manejo Florestal, pelo convívio diário, amizade, conversas produtivas e de aprendizagem.

As meninas do Laboratório de Monitoramento Ambiental da Embrapa Florestas pela ajuda no início dessa trajetória, em especial a pesquisadora Denise Jeton Cardoso.

Ao Luciano por todo o apoio, companheirismo e dedicação.

À minha família por todo amor e apoio.

Aos amigos Franciel e Cristine, pela convivência diária e momentos de alegria que vivemos juntos nesses dois anos.

As amigas que mesmo distante sempre se fizeram presente Pâmela e Vanessa.

A todas as pessoas que de alguma forma colaboraram e torceram para a realização desse trabalho. Sou muito grata!

Faça o melhor que puder e faça-o de acordo com seu padrão interior próprio (ou consciência, se assim preferir), não para o conhecimento e avaliação de seus atos pela sociedade. (Dalai – Lama)

RESUMO

O espaçamento é um importante fator que influencia o crescimento, a competição entre as árvores e consequentemente a produção florestal. Entender o comportamento de espécies comerciais como do gênero *Eucalypto* em diferentes espaçamentos é de fundamental interesse para o planejamento florestal. Com isso, o objetivo geral do trabalho foi avaliar a competição de clones de *Eucalyptus* spp. e as estimativas dendrométricas em diferentes espaçamentos utilizando o delineamento sistemático de Nelder. Os dados utilizados no estudo são provenientes de um experimento com dez clones de eucalypto, implantados em nove círculos de Nelder adaptados, localizados no norte estado do Tocantins, Brasil. O trabalho está estruturado em três capítulos, em que, no primeiro capítulo foi abordada a relação entre as variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume com a área vital por planta; também foi verificada a autocorrelação espacial entre as observações e aplicada a análise multivariada de perfil. No segundo capítulo foi desenvolvido um índice para descrever a competição entre as árvores em diferentes espaçamentos, bem como comparado o desempenho de índices tradicionais dependentes e independentes da distância em diferentes espaçamentos e avaliado o efeito da competição na mortalidade das árvores. O índice (*IC* proposto) foi formulado levando-se em consideração que a competição é dependente da densidade do povoamento e quanto mais próximas as árvores estiverem maior será a competição; a alta densidade também exerce influência nos diâmetros do povoamento. Assim, o índice resulta do produto de duas razões, a primeira refere-se à área geométrica média das distâncias entre as árvores na parcela de maior competição, em relação as demais parcelas. A segunda razão é referente a média quadrática dos diâmetros de todas as árvores na parcela de maior competição, em relação às médias quadráticas dos diâmetros de todas as árvores das demais parcelas. No terceiro capítulo foram obtidas as estimativas dos parâmetros dendrométricos: número de árvores, área basal e volume por hectare por meio da amostragem de Prodan nos diferentes espaçamentos propiciados pelo delineamento sistemático de Nelder. As hipóteses que motivaram a realização do trabalho foram: O comportamento das variáveis dendrométricas altura, diâmetro e volume, apresenta variação nos diferentes espaçamentos, em que as árvores de maiores dimensões estão nos espaçamentos mais amplos; Existe autocorrelação espacial entre as árvores, devido à disposição delas nos diferentes espaçamentos; O novo índice de competição proposto pode explicar melhor o efeito da competição em locais com diferentes espaçamentos, uma vez que ele é adimensional, com uma escala padronizada, facilitando a interpretação dos resultados. Os resultados encontrados indicam que o índice proposto é apropriado para avaliar a competição das árvores, e apresentou resultados superiores comparado aos índices de competição tradicionais. Os valores das variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume foram maiores nos espaçamentos mais amplos. A existência de autocorrelação espacial foi confirmada para as variáveis diâmetro e altura. A análise multivariada de perfil é eficiente para comparar a diferença dos tratamentos em delineamento sistemático de Nelder. As estimativas obtidas com a amostragem de Prodan, mostraram que o número de árvores, área basal e volume por hectare apresentam comportamento decrescente com o aumento do espaçamento. A amostragem de Prodan é adequada e prática para se obter estimativas em delineamento sistemático de Nelder, uma vez que não é preciso mensurar todas as árvores presentes no experimento, e o número de árvores nas UAs distribuídas em diferentes espaçamentos é o mesmo.

Palavras-chave: Espaçamento. Índice de competição. Método de Prodan. Análise de Perfil.

ABSTRACT

Spacing is an important factor that influences growth, competition between trees and consequently forest production. Understanding the behavior of commercial species such as *Eucalyptus* in different spacing is of fundamental interest for forest planning. Thus, the overall objective of the work was to evaluate the competition of *Eucalyptus* spp. and the dendrometric estimates at different spacings using Nelder's systematic design. The data used in the study come from an experiment with ten eucalyptus clones implanted in nine adapted Nelder circles, located in the northern state of Tocantins, Brazil. The work is structured in three chapters, in which, in the first chapter the relationship between the dendrometric variables diameter, height and volume with the vital area per plant was discussed; the spatial autocorrelation was also verified between the observations and the multivariate profile analysis was applied. In the second chapter an index was developed to describe the competition between the trees in different spacings, as well as the performance of traditional indexes dependent and independent of the distance in different spacings and evaluated the effect of competition on mortality of the trees. The index (IC proposed) was formulated taking into account that the competition is dependent on the population density and the closer the trees are, the greater the competition; the high density also exerts influence in the diameters of the stand. Thus, the index results from the product of two ratios, the first ratio is related to the average geometric area of the distances between the trees in the most competitive plot, in relation to the other plots. The second ratio refers to the quadratic mean of the diameters of all the trees in the most competitive plot, in relation to the quadratic means of the diameters of all the trees of the other plots. In the third chapter the estimates of the dendrometric parameters were obtained: number of trees, basal area and volume per hectare by means of the Prodan sampling method in different spacings provided by the Nelder systematic design. The hypotheses that motivated the work were: The behavior of the dendrometric variables height, diameter and volume, presents variation in the different spacings, in which the larger trees are in the wider spacings. There is spatial autocorrelation between the trees, due to their arrangement in the different spacings. The proposed new competition index can better explain the effect of competition in locations with different spacing, since it is dimensionless with a standardized scale, facilitating the interpretation of the results. The results indicate that the proposed index is appropriate to evaluate the competition of the trees, and presented superior results compared to the traditional competition indexes. The values of the dendrometric variables diameter, height and volume were larger in the wider spacings. The existence of spatial autocorrelation was confirmed to the variables diameter and height. The multivariate profile analysis is efficient to compare the difference of treatments in a systematic Nelder's design. Estimates obtained with Prodan's sampling method showed that the number of trees, basal area and volume per hectare presented decreasing behavior with increasing spacing. Prodan's sampling method is adequate and practical to make estimates in a Nelder's systematic design, since it is not necessary to measure all the trees present in the experiment, and the number of trees in the plots distributed in different spacings is the same.

Keywords: Spacing. Competition index. Prodan's sampling method. Profile Analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 EUCALIPTO	17
2.2 DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER	18
2.3 COMPETIÇÃO	21
2.4 MÉTODO DE AMOSTRAGEM DE PRODAN.....	23
REFERÊNCIAS	26
 CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DE UM EXPERIMENTO FLORESTAL EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER	
RESUMO.....	32
ABSTRACT	33
1 INTRODUÇÃO	34
2 MATERIAL E MÉTODOS	36
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	36
2.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	37
2.3 COLETA DOS DADOS.....	40
2.4 ANÁLISE DOS DADOS	40
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
3.1 CORRELAÇÃO E CRESCIMENTO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ..	43
3.2 DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA.....	49
3.3 AUTOCORRELAÇÃO	53
3.4 ANÁLISE MULTIVARIADA DE PERFIL	58
4 CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS	71

CAPÍTULO II: COMPETIÇÃO DE CLONES DE EUCALIPTO EM DELINEAMENTOS SISTEMÁTICOS DE NELDER

RESUMO.....	74
ABSTRACT	75
1 INTRODUÇÃO	76
2 MATERIAL E MÉTODOS	78
2.1 ÁREA DE ESTUDO	78
2.2 ESTUDO DA COMPETIÇÃO.....	78
2.2.1 Método de amostragem e seleção das árvores competidoras	78
2.2.2 Coleta dos dados.....	79
2.2.3 Desenvolvimento do Índice de competição	80
2.2.4 Análise dos dados	81
2.2.5 Análise de correlação.....	82
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
3.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO.....	83
3.2 NOVO ÍNDICE DE COMPETIÇÃO – <i>IC PROPOSTO</i>	89
3.3 COMPETIÇÃO POR CLONE E MORTALIDADE	91
4 CONCLUSÃO.....	95
REFERÊNCIAS	96

CAPÍTULO III: ESTIMATIVAS DENDROMÉTRICAS DE PRODAN OBTIDAS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER

RESUMO.....	100
ABSTRACT	101
1 INTODUÇÃO	102
2 MATEIAL E MÉTODOS	103
2.1 ÁREA DE ESTUDO	103
2.2 COLETA DE DADOS	103
2.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS	105
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
4 CONCLUSÕES.....	113
REFERÊNCIAS	114
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	116
5.1 COMPETIÇÃO	116
5.2 ESPAÇAMENTO.....	116

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	116
5.4 CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> SPP.	117
REFERÊNCIAS GERAIS	118

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de usar madeira de espécies do gênero *Eucalyptus* spp. em uma variedade de propósitos e as características desejáveis da espécie levou grandes e pequenas empresas a estabelecer florestas com a espécie (GONÇALVES et al., 2013). A experiência brasileira em produção de eucalipto demonstra possíveis ganhos contínuos na produtividade. A taxa de aumento tem sido constante há mais de 40 anos, indicando que os ganhos de produtividade estão associados à melhoria do genótipo e das práticas de manejo florestal.

Com isso, o desafio da silvicultura é projetar e usar regimes de manejo que mantenham ou viabilizem o aumento das taxas de crescimento e a qualidade da madeira, manipulando o fornecimento e o uso de recursos. A determinação do espaçamento é um dos fatores mais importantes e influentes na produção florestal, pois interfere na idade de corte, nas práticas silviculturais empregadas e, conseqüentemente, nos custos de produção (ELOIY et al., 2013).

Durante os últimos anos, o aumento de pesquisas sobre o espaçamento ideal e a densidade de plantas em plantios florestais permitiu melhor compreensão de seus efeitos sobre o crescimento das árvores e a qualidade da madeira, com destaque aos trabalhos de Coelho et al. (1970), Leite et al. (1999), Martins et al. (2009), Oliveira et al. (2009), Oliveira Neto et al. (2010) e Moulin et al. (2015). Nos experimentos conduzidos por esses autores, os tratamentos (espaçamentos de cultivo), foram testados em unidades experimentais independentes, distribuídas aleatoriamente dentro de blocos no campo.

O delineamento sistemático proposto por Nelder (1962) é uma alternativa para estudar o efeito do espaçamento sobre o crescimento de plantas. Esse delineamento foi introduzido em experimentos na área agrícola, mas também tem sido utilizado em pesquisas florestais desde então, destacando-se o pioneirismo de Freeman (1964), Namkoong (1966), Panetsos (1980), Land e Nance, (1987), Monteiro e Cordeiro (1983). O primeiro trabalho realizado no Brasil, utilizando o delineamento de Nelder, foi efetuado por Stape (1995), seguido pelas pesquisas de Oda-Souza et al. (2008), Moraes et al. (2013) e Aquino (2018).

Por meio do delineamento sistemático de Nelder é possível avaliar diferentes espaçamentos em áreas relativamente pequenas, o que não acontece com os experimentos tracionais. A principal característica refere-se à distribuição das plantas em interseções de raios e arcos, os quais definem densidades (diferentes espaçamentos) ao longo do comprimento dos raios. Entretanto, a falta de casualização no delineamento sistemático de

Nelder dificulta o uso de análises convencionais para avaliá-lo estatisticamente, pois a independência dos dados não é garantida, e a disposição das árvores nos espaçamentos em uma escala ordenada aumenta a possibilidade de autocorrelação. Nessa situação torna-se importante utilizar outras opções de técnicas estatísticas, com o intuito de realizar análises precisas dos experimentos em delineamento sistemático de Nelder.

Apesar disso, o uso do delineamento de Nelder tem potencial para responder à questões sobre interações das plantas e a área necessária para utilizar os recursos de forma sustentada. Em grandes espaçamentos pode ocorrer desperdícios, uma vez que os recursos disponíveis podem exceder a capacidade fisiológica de assimilação da planta, não havendo aumento de crescimento. Em espaçamentos reduzidos, pode ocorrer competição (TEODORO, 2016), sendo essa uma condição determinante para o desenvolvimento do povoamento e altamente associada ao espaçamento entre as plantas (PRODAN et al., 1997).

A competição é um importante fator que estrutura comunidades de plantas (KEDDY, 2001). Essa inicia-se quando os recursos necessários para o crescimento das árvores diminuem, afetando o desempenho produtivo das plantas. É desejável saber o momento inicial da competição em plantios florestais, de modo a evitar perdas de incremento e produtividade e também diminuir a mortalidade (WEBER et al., 2008). Com isso, são levantados os primeiros questionamentos que motivaram a apresentação dessa pesquisa: *A competição influencia na mortalidade? Quais são as taxas de mortalidade em função da competição?*

A competição é medida utilizando índices de competição, que são calculados aplicando formulação matemática. Na literatura, foram propostos uma quantidade considerável de índices de competição, que podem ser utilizados em diferentes situações, povoamentos e espécies. Porém, esses índices apresentam algumas limitações quanto a interpretação dos resultados, pois não são adimensionais e não apresentam uma escala de limites para os resultados. A configuração de um índice de competição com essas características é interessante e importante, pois pode facilitar a interpretação dos resultados.

Por essas razões, torna-se interessante estudar o comportamento da competição em diferentes espaçamentos, utilizando um índice que permita uma interpretação mais apropriada e simples. *Qual é o comportamento dos índices de competição tradicionais dependentes e independentes da distância em diferentes espaçamentos? É mais adequada realizar a avaliação da competição por meio de um novo índice de competição adimensional em relação aos índices tradicionais?*

O delineamento sistemático de Nelder permite também a estimativa das variáveis número de plantas, área basal e volume por hectare; essas informações são importantes em nível de povoamento. Utilizar um método de amostragem nesse delineamento possibilita avaliar essas estimativas ao longo dos diferentes espaçamentos, bem como o comportamento do método de amostragem.

A amostragem de Prodan apresenta características adequadas e úteis para ser aplicado no delineamento de Nelder, uma vez que o número de árvores nas parcelas é o mesmo nos diferentes espaçamentos, pois tem como variável de inclusão a distância da árvore em relação ao ponto amostral, enquanto o tamanho da unidade amostral também depende dessa distância, não ocorre erros de demarcação de unidade amostral, além da praticidade e facilidade operacional a campo (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1998).

Além disso, não foram encontradas na literatura pesquisas que abordam métodos de amostragem em delineamento sistemático de Nelder para estimativa das variáveis número de árvore, área basal e volume por hectare. *Assim, como é o comportamento dos estimadores da amostragem de Prodan em diferentes espaçamentos?*

Para responder as perguntas delineadas, este trabalho foi composto pelas seguintes partes, que foram organizadas em capítulos:

- 1 – Revisão de literatura: detalhando os principais temas que serão abordados no trabalho (Eucalipto, delineamento sistemático de Nelder, competição e a amostragem de Prodan);
- 2 – Caracterização das variáveis dendrométricas de um experimento florestal em delineamento sistemático de Nelder;
- 3 – Competição de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos propiciados pelo delineamento sistemático de Nelder;
- 4 – Comportamento das estimativas das variáveis número de árvores, área basal e volume por hectare, utilizando o método de Prodan, em diferentes espaçamentos.
- 5 – Considerações finais do trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a competição de clones de *Eucalyptus* spp. e as estimativas dendrométricas em diferentes espaçamentos utilizando o delineamento sistemático de Nelder.

1.2.2 Objetivos específicos

- i) Avaliar a relação entre as variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume com a área vital;
- ii) Caracterizar a estrutura das variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume dos clones de *Eucalyptus* spp. sob influência de diferentes espaçamentos;
- iii) Analisar a distribuição diamétrica das árvores sob diferentes espaçamentos;
- iv) Verificar a autocorrelação e dependência espacial para as variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume;
- v) Comparar os perfis médios das variáveis altura, diâmetro e volume para os diferentes clones de eucalipto;
- vi) Desenvolver um índice para descrever a competição das árvores em diferentes espaçamentos;
- vii) Comparar o índice desenvolvido e proposto na pesquisa com os índices tradicionais dependente e independente da distância;
- viii) Comparar o desempenho dos índices de competição dependentes e independentes da distância em diferentes espaçamentos;
- ix) Avaliar o efeito da competição na mortalidade de árvores;
- x) Avaliar o comportamento das estimativas das variáveis número de árvores, área basal e volume por hectare, obtidas pela amostragem de Prodan e suas adaptações em diferentes espaçamentos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 EUCALIPTO

O eucalipto destaca-se por ser uma das espécies mais utilizadas no reflorestamento, sendo cultivada em dobro quando comparada à espécie *Pinus*. Esse fator é resultante do alto índice de rentabilidade que o eucalipto apresenta, já que o seu cultivo permite a extração da celulose, carvão vegetal e a produção de chapas de madeira amplamente utilizadas pela indústria civil (INFLOR, 2017).

O eucalipto foi introduzido no Brasil em 1825; as árvores da espécie foram utilizadas como plantas ornamentais no Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Os primeiros plantios da espécie foram efetuados em 1868, com a finalidade de gerar lenha e fornecer barreira contra o vento no Rio Grande do Sul. Porém, para a produção florestal em larga escala, a espécie ganhou impulso em 1909, em todo território nacional (INFLOR, 2017).

Segundo a ABRAF (2013) os principais estudos com eucalipto tem sido conduzidos em Minas Gerais e São Paulo, e atualmente possuem áreas de plantio de 1.438,931 hectares e 1.041,695 hectares respectivamente, entretanto, com as novas tecnologias, outros estados estão aumentando as áreas plantadas. A grande concentração de plantios florestais nas regiões sul e sudeste provocou aumento do preço da terra, impulsionando o desenvolvimento de novos projetos florestais na região norte (JESUS, 2014).

Os projetos florestais na região norte têm sido direcionados principalmente para o estado do Tocantins, o qual apresenta uma extensão territorial de 277.620,914 km², que representa 3,26% do território nacional e 7,2% da região Norte. O estado ainda possui 97,9% de sua área total inserida na Amazônia Legal. Como fonte de escoamento hidrográfico, o Tocantins se divide em duas bacias hidrográficas, a do rio Araguaia que representa 37,7% da área do estado (cerca de 104.791,8 km²) e a do rio Tocantins que representa 62,3% da área (cerca de 172.828,2 km²). O Tocantins ainda é rico em recursos hídricos, apresentando 30 bacias hidrográficas estaduais que se dividem em 18 áreas estratégicas de gestão (SEPLAN, 2012).

Os primeiros plantios de eucalipto surgiram no início da criação do estado, entre os anos de 1990 a 1992, tinham como principal finalidade a sustentabilidade das fazendas, eram constituídos de pequenas áreas de no máximo cinco hectares (JESUS, 2014). O estado do Tocantins até o ano de 2006 possuía uma área de 13.901 hectares plantados com eucalipto, já no ano de 2012, a área plantada com a espécie era de 109.000 hectares e em 2016 passou

para 116.798 hectares (IBÁ, 2017). A principal utilização da madeira no mercado é para geração de energia (sobretudo à secagem de grãos), a produção de carvão para fins siderúrgicos e madeira tratada, em todos os casos ainda em baixa escala (SEMADES, 2013).

Mesmo existindo no mercado comercial muitos clones com o possível potencial de adaptação para a região quente e seca, ainda sim, há algumas restrições com relação à escolha do manejo, o que é um desafio para o produtor (JESUS, 2014).

2.2 DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER

Ao trabalhar com delineamentos sistemáticos para experimentos espaciais a serem utilizados na área hortícola, Nelder (1962) apresentou cinco diferentes tipos de desenhos experimentais, os quais os denominou de *Ia*, *Ib*, *Ic*, *Id* e *II*. Os delineamentos se caracterizam por possuir, em geral, formato retangular quanto a posição da grade das plantas, assim a planta tem vizinhas próximas; a grade pode ser definida por conjuntos de curvas, as quais podem ser linhas retas ou arcos de círculos concêntricos; a densidade e as retangularidades variam dentro da malha de pontos para se obter um número maior de combinações (NELDER, 1962).

O delineamento *Ia* se caracteriza por apresentar o arranjo de plantas constante, ou seja, existe uma retangularidade constante, e a área ocupada por planta aumenta ao longo do comprimento do raio do ponto central. No delineamento *Ib* a área das plantas é constante, e o delineamento *Ic* a retangularidade muda com o raio r , e a densidade é constante por toda extensão das linhas perpendiculares à linha da base. No delineamento *Id* ocorre mudança na densidade com o raio r , já a retangularidade é mantida constante. No delineamento *II* a densidade das plantas e a retangularidade diferem sistematicamente (NELDER, 1962).

Dentre os delineamentos propostos, o *Ia* se destaca dos demais, sendo esse o delineamento mais utilizado em experimentação de campo na área florestal, em estudos sobre plantios homogêneos e agrossilvicultura. A denominação mais utilizada para o delineamento é sistemático tipo leque (STAPE, 1995).

Nelder (1962) descreve o delineamento tipo leque, como um sistema de raios e arcos de círculos concêntricos. Com o aumento da distância da árvore à origem a área por planta aumenta, sendo os raios separados por um ângulo constante e os arcos espaçados por uma progressão geométrica da distância radial. Assim sendo, uma planta é instalada nas interseções de raios e arcos e, naturalmente, vão se formando as densidades ao longo do comprimento dos raios, dentro de um único lote, eliminando a necessidade de separar as

parcelas e constituí-las de forma independente (ALEIXO, 2012). A utilização desse delineamento na área florestal é destacada pela compacidade e necessidade de pequena área experimental, sendo de fácil manejo e abrangência, possibilitando o estudo de um grande número de espaçamentos (STAPE, 1995; ODA- SOUZA et al., 2008).

Após o uso inicial do delineamento na área hortícola, em seguida foi aplicado em plantas arbóreas por Freeman (1964), no estudo de espaçamento em cacau. Namkoong (1966) considerou o delineamento tipo leque de extrema utilidade em estudo de diferentes genótipos de árvores por espaçamento, por permitir se trabalhar com muitas famílias em diferentes espaçamentos e numa área compacta. Panetsos (1980) estudou a seleção de novos clones de Álamo sob diferentes espaçamentos, utilizando o delineamento tipo leque. Land e Nance (1987) utilizaram o delineamento tipo “leque” para testar progênies de *Pinus taeda*, com idade de 10 anos, para avaliar a interação entre progênies e espaçamento, sugerindo uma forma de determinar a área potencialmente disponível por planta para corrigir os desvios causados por mortalidade e dominância de árvores, e utilizando-a como covariável na análise. Mabvurira e Miina (2002) estudaram modelos individuais de crescimento e mortalidade de árvores de *Eucalyptus grandis* em círculos de Nelder, localizados no Zimbábue. Parroti et al. (2011) discutiram técnicas de análise estatísticas a serem utilizadas em delineamento sistemático de Nelder, considerando a autocorrelação dos dados. Uhl et al. (2015) utilizaram o delineamento sistemático de Nelder para analisar o efeito da densidade do povoamento e condições do local na estrutura e crescimento de espécies de carvalho ao longo de um gradiente ambiental nos países da Europa e no México.

No Brasil o delineamento sistemático de Nelder foi utilizado primeiramente por Stape (1995), ao estudar diferentes espaçamentos para a espécie *Eucalyptus dunnii*. O autor concluiu que esse delineamento possibilitou conhecer os padrões de resposta para a espécie ao espaçamento, tanto em termos de crescimento individual como conjunto, numa amplitude que dificilmente seria avaliada via delineamentos aleatórios tradicionais.

Moraes et al. (2013), após estudarem a variação genética e avaliar o desenvolvimento silvicultural de *Jacaranda cuspidifolia*, em diferentes espaçamentos, a partir de um teste de progênies, utilizando um delineamento sistemático de Nelder, sugeriram que esse delineamento seja utilizado quando se tem a finalidade de estimar a variação genética e conhecer os padrões de resposta aos espaçamentos de espécie florestal.

Aquino (2017) avaliou a influência do espaçamento nas variáveis de crescimento e produção de eucalipto e concluiu que o delineamento sistemático tipo “leque” permitiu conhecer os padrões de resposta das árvores do híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x

Eucalyptus grandis em função do espaçamento, tanto em termos de crescimento individual como conjunto, numa amplitude que não é comumente avaliada por meio de delineamentos tradicionais.

Geralmente são utilizadas técnicas de análise de regressão para modelar a relação entre densidade de árvores e crescimento de árvores em delineamento sistemático de Nelder. Entretanto, a estrutura sistemática na distribuição das plantas, influencia a adequação dos métodos estatísticos empregados no círculo de Nelder (PARROT et al. 2011). Com isso, as análises devem utilizar modelos estatísticos que considerem a autocorrelação espacial, pois a presença de dependência espacial ocasiona problemas na aplicação de métodos estatísticos clássicos, que assumem independência entre as observações (FOX et al. 2007; UHL et al. 2015).

Como alternativa para verificar existência de autocorrelação entre as observações em delineamento sistemático de Nelder, Oda-Souza et al. (2008) estudaram a aplicação de métodos geoestatísticos em um experimento com *Eucalyptus dunnii* com idade de 6 anos, e concluíram que os métodos geoestatísticos foram adequados para verificar a existência de dependência espacial e autocorrelação nesse delineamento. Teodoro et al. (2018) utilizaram as mesmas técnicas geoestatísticas em delineamento sistemático de Nelder implantados com a espécie *Peltophorum dubium* (canafistula), e relataram a existência de autocorrelação e dependência espacial para as variáveis altura, aos 6, 13, 25 e 37 meses após o plantio, e diâmetro aos 13, 25 e 37 meses após o plantio. Fox et al. (2001) e Fox et al. (2007), utilizaram o correlograma do índice de Moran I, para avaliar a autocorrelação entre as observações nos vários estágios de desenvolvimento de um povoamento de *Eucalyptus pilularis*.

Além dos estudos relacionados à influência de diferentes espaçamentos sobre as espécies florestais, pesquisas sobre competição entre árvores foram desenvolvidas em delineamento sistemático de Nelder. Vanclay (2006), Vanclay et al. (2013), e Uhl et al. (2015), utilizaram o delineamento sistemático de Nelder para estudar a calibração dos índices de competição em diferentes espaçamentos. Segundo Vanclay (2006), os círculos de Nelder possibilitam obter informações sobre a calibração dos índices de competição melhor do que os plantios retangulares em uma grade regular, uma vez que é aparente que os espaçamentos retangulares oferecem um intervalo mais restrito de distâncias entre árvores, e que o vizinho mais próximo é mais ou menos constante, em contraste com a ampla gama de espaçamentos oferecidos pelos leques de Nelder e outros projetos nos quais o espaçamento varia sistematicamente.

2.3 COMPETIÇÃO

A competição é definida como a interação entre indivíduos, provocada por um recurso compartilhado em oferta limitada, levando a uma redução na sobrevivência e crescimento (BEGON et al., 1986). A competição inicia-se quando os recursos necessários para o crescimento das árvores diminuem, afetando o desempenho produtivo das plantas (WEBER et al., 2008).

Outros autores definem a competição como a falta de espaço resultante de uma alta densidade de indivíduos, influenciando diretamente seu desenvolvimento (ASSMANN, 1970). Uma alta ou baixa densidade de plantas por área gera um desempenho produtivo diferenciado, em função de competição por espaço, água, luz e nutrientes que estão presentes no ambiente vegetal (ZANINE E SANTOS, 2004).

A dinâmica das florestas é influenciada pela competição de múltiplas formas. O crescimento é reduzido, particularmente o crescimento do diâmetro, e a probabilidade de mortalidade aumenta, causando estagnação, instabilidade e estratificação das árvores (WEISKITTEL et al., 2011). Segundo Weiskittel et al. (2011), à medida que as árvores crescem e modificam seu ambiente circundante, alteram a capacidade de seus vizinhos de conseguir recursos, apresentando a competição de maneira altamente dinâmica, tanto espacial como temporariamente.

A influência que as árvores vizinhas exercem, pode ser expresso por alguma formulação matemática, compondo um índice de competição, que representa o quanto cada árvore é afetada pelos seus vizinhos (TOMÉ E BURKHART, 2012). As duas principais classes de índices de competição são os índices independentes da distância e dependentes da distância (MUNRO, 1974).

Os índices independentes da distância são funções simples, com variáveis de dimensões de uma árvore objeto em relação às árvores competidoras, não utilizando as coordenadas dos indivíduos (TOMÉ e BURKART, 2012). Já os índices dependentes da distância abrangem o tamanho das árvores vizinhas e sua distância até a árvore objeto (WEISKITTEL et al., 2011; TOMÉ e BURKART, 2012).

O primeiro índice de competição entre árvores foi apresentado por Staebler em 1951. Ele assumiu que cada árvore tinha uma área circular de influência expressa em função de seu tamanho e media a tensão competitiva como o grau em que essa área de influência era sobreposta pelas de seus vizinhos (TOME e BURKART, 2012). Posteriormente, Clark e Evans (1954) desenvolveram um índice de competição utilizando a distância média da

árvore central para os vizinhos mais próximos. Este índice descreve a heterogeneidade espacial das árvores dentro de um suporte, estimando o quanto eles se desviam de um padrão aleatório, em média (WEISKITTEL et al., 2011). Spurr (1962), Lemmon e Schumacher (1962), utilizaram medidas da área basal local em torno das árvores objetos para verificar a influência da competição. Newnham (1964) utilizou ângulos das copas sobrepostas no índice de competição.

Após os primeiros trabalhos foi desenvolvida uma grande variedade de índices de competição, que, atualmente, são amplamente utilizados. Dentre os índices de competição independentes da distância estão os desenvolvidos por Stage (1973), Glover e Hool (1979), Daniels et al., (1986), Lorimer (1983) e Tomé e Burkhart (1989). Os índices dependentes da distância foram propostos por Hegyi (1974), Moore et al. (1973), Rouvinen e Kuuluvainen (1997). Uma extensa literatura sobre esses índices pode ser encontrada na pesquisa de Curto (2015), em que os índices de competição foram utilizados para a espécie *Araucaria angustifolia* em plantios superestocados.

Os índices de competição podem ser utilizados em diferentes situações, povoamentos e espécies (DANIELS et al., 1986). Segundo Biging e Dobbertin (1995), nenhum índice, dependente ou independente da distância, tem se mostrado superior aos demais, sendo a superioridade de um índice verificada somente para determinadas situações e espécies.

A competição em situações com diferentes espaçamentos foi relatada em poucos estudos, entre eles, Vanclay (2006) utilizou o delineamento sistemático de Nelder para avaliar interações inter- e intra-específicas em plantios mistos de árvores, objetivando estudar a conveniência de experimentos que abrangem uma variedade de espaçamento e composição de árvores para informar a calibração dos índices de competição. Vanclay et al. (2013) utilizaram o delineamento sistemático de Nelder buscando calibrar índices de competição em resposta a duas espécies, *Araucaria cunninghamii* e *Flindersia brayleyana*, e concluíram que esse tipo de delineamento garante robustez na avaliação da competição.

Uhl et al. (2015) aplicaram índices de competição dependentes e independentes da distância em delineamento sistemático de Nelder, implantado com espécies de *Quercus robur* L nos países da Europa, na Bélgica, Alemanha, Itália, Hungria e no México. A avaliação da competição nesse delineamento permitiu verificar a diferença no crescimento, e uma alta variabilidade nas relações alométricas.

Além dos índices citados amplamente utilizados na literatura, novas abordagens para estudar a competição estão sendo apresentadas recentemente, entre elas, Hui et al., (2018) desenvolveram um índice de competição para florestas nativas envelhecidas da China,

nomeado de *SCI* - Índice de Competição Baseado em Estrutura, calculado de acordo com as características da estrutura espacial entre a árvore referência e suas quatro árvores vizinhas mais próximas e obtiveram resultados tão bons quanto os índices de competição de Heygi.

Yang et al. (2017) desenvolveram um novo índice de competição adaptando o índice de densidade relativa de Reineke (1933), uma vez que o índice de Reineke foi considerado inadequado para espécies mistas e florestas estruturalmente complexas. A pesquisa foi desenvolvida em Taiwan, utilizando dados do 4º Inventário Florestal Nacional de Taiwan. Para cada tipo de floresta foi produzido um modelo diferente de índice. Contudo, os trabalhos realizados no Brasil utilizaram apenas os índices tradicionalmente apresentados na literatura em situações de florestas plantadas com o mesmo espaçamento (MARTINS et al., 2011; CURTO, 2015; MIRANDA, 2016).

2.4 MÉTODO DE AMOSTRAGEM DE PRODAN

O método de amostragem de Prodan (1968), conhecido como Método de 6 árvores, considera a medição de seis árvores e a distância da sexta árvore como referência da unidade amostral. A relação de inclusão de uma árvore na amostragem tem como variável a sua distância em relação ao ponto amostral, portanto, a seleção das árvores se faz com probabilidade proporcional à distância (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1998).

Como principais vantagens desse método Péllico Netto e Brena (1998) mencionam a praticidade e facilidade operacional no campo, a possibilidade de levantamento de várias unidades amostrais no tempo equivalentes à medição de uma unidade de área fixa, devido ao seu tamanho, menor tempo de medição de todos os métodos e não ocorrência de demarcação da parcela. Segundo Sanquetta et al. (2006), devido principalmente ao desconhecimento de seu potencial de uso e vantagens, este método ainda é pouco utilizado em inventários florestais no Brasil.

O tamanho da unidade amostral não permite obter bons estimadores para variáveis como altura dominante, mortalidade e outras, sendo uma desvantagem desse método. Outra desvantagem é que os estimadores podem gerar tendenciosidades quando as árvores estão muito aglutinadas ou muito espalhadas no povoamento (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1998).

Algumas pesquisas que utilizaram o método de Prodan revelaram essas características citadas. Miranda et al. (2015), estudando a precisão e eficiência relativa de métodos de amostragem em teca mencionaram que o método de Prodan resultou no menor

tempo de medição entre os demais métodos, porém foi o que apresentou o maior coeficiente de variação, afetando sua eficiência. Os mesmos autores encontraram superestimativa no número médio de árvores por hectare, quando aplicados os métodos de Prodan (+26,40%) e Bitterlich (+11,32%) em relação ao método de área fixa. Nascimento et al. (2015) também observaram superestimativa para o número de árvores por hectare ao comparar os resultados dos métodos de Bitterlich, Prodan e Strand ao censo de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no estado do Paraná.

Ao comparar os métodos de quadrantes e Prodan para análise florística, fitossociológica e volumétrica, Brito et al. (2007) observaram que para as estimativas do estoque volumétrico, o método de Prodan proporcionou subestimativa para o volume total e superestimativa para espécies de baixa dominância. Para a análise fitossociológica, os dois métodos apresentaram resultados satisfatórios, enquanto que para a análise florística, o método de Prodan apresentou melhor desempenho, para o fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana, no município de Lavras, Minas Gerais.

Moscovich, Brena e Longhi (1992) observaram que o método de Prodan gerou subestimativa para todos os parâmetros analisados (volume, área basal, número de árvores por hectare e número de espécies), em comparação aos métodos de Strand, Bitterlich, quadrantes e pelo método de área fixa, para uma Floresta nativa de *Araucaria angustifolia*. Péllico Netto et al. (2012), ao quantificar os parâmetros dendrométricos em árvores de araucárias nativas e avaliar o comportamento probabilístico dos raios das sextas árvores, na FLONA de Irati- PR, concluíram que o volume médio por hectare estimado pelo método de Prodan apresentou valores próximos aos obtidos em outros locais com condições semelhantes, porém usaram uma árvore referência como centro da unidade amostral e não um ponto aleatório no povoamento florestal.

Visando adaptar o método de Prodan para aumentar a eficiência na amostragem, Curto (2015) instalou unidades amostrais em que o centro da parcela foi tomado a partir de uma árvore, portanto esta foi contabilizada no cálculo de área basal e número de árvores por hectare. Essas variáveis foram estimadas, seguindo-se os passos do método de Prodan apresentado por Péllico Netto e Brena (1997) em plantios superestocados de *Araucaria angustifolia*, na Floresta Nacional de Açungui.

Araújo et al. (2018) estudando o desempenho de métodos de amostragem de área variável para regeneração natural da espécie *Eremanthus erythropappus*, consideraram a distância do primeiro até o trigésimo indivíduo mais próximo do ponto amostral, caracterizando o método original de Prodan mais 29 variações dele. Entretanto, não existem

trabalhos na literatura que aplicaram o método de amostragem de Prodan ou descreveram seu comportamento em diferentes espaçamentos.

REFERÊNCIAS

- ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012. ABRAF – Brasília, 2013.
- ALEIXO, V. **Desenvolvimento de *Jatropha curcas* (L.) em função da procedência, sistema de cultivo e densidade**. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2012.
- AQUINO, P. S. **Crescimento inicial de eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo “leque”**. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- ARAÚJO, E. J. G; PÉLLICO NETTO, S; MORAES, V. A; DAVID, H. C; CURTO, R. de A; SCOLFORO, J. R. S. Métodos de amostragem de área variável para a regeneração natural de *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish. **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 2, p. 265-276, abr. /jun. 2018.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970.
- BEGON, M; TOWNSEND, C. R; HARPER, J. L. **Ecology: from individuals to ecosystems** (quarta ed.). Blackwell Science, Malden, EUA, 2006.
- BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. Evaluation of Competition Indices in Individual Tree Growth Models. **Forest Science**, v. 41, n. 2, p. 360-377, 1995.
- BLOG DA INFLOR Forest. Vitória, ES. Não Paginado. Disponível em: www.inflor.com.br. Acesso em: 18 nov. 2018.
- BRITO, A. de; FERREIRA, M. Z.; MELLO, J. M. de; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA A. D. de. ACERBI JÚNIOR, F. W. Comparação entre os métodos de quadrantes e Prodan para análises florística, fitossociológica e volumétrica. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 399-405, out./dez. 2007.
- CLARK, P.J; EVANS, F.C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. **Ecology**, Washington, v 35, p. 445–453, out.1954.
- COELHO, A. S. R.; MELO, H. A.; SIMÕES, J. W. Comportamento de espécies de eucaliptos face ao espaçamento. **IPEF** n.1, p.29-55, 1970.
- CURTO, R. de A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal Forest Research**, Vancouver, v. 16, p. 1230-1237, abr. 1986.
- ELOY, E.; CARON, B. O.; TREVISAN, R.; SCHMIDT, D.; ZANON, M. L. B.; BEHLING, A.; MONTEIRO, G. C. Variação longitudinal e efeito do espaçamento na

massa específica básica da madeira de *Mimosa scabrella* e *Ateleia glazioviana*. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 2, p. 327 - 334, 2013.

FABER, P.J.A distance-dependent model of tree growth. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 41, p. 111-123, 1991.

FOX, J. C.; ADES P. K.; BI, H. Stochastic structure and individual-tree growth models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 154, p. 261-276, 2001.

FREEMAN, G. H. The use of systematic design for a spacing trial with a tropical tree crop. **Biometrics**, Washington, v. 20, n. 1, p. 200-203, mar. 1964.

GLOVER, G. R.; Hool, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v. 25, p. 275–282, 1979.

GONÇALVES, J. L. de M; ALVARES, C. A. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, ago. 2013.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J. **Growth models for tree and stand simulation**. Stockholm Sweden: Royal College of Forestry, p. 74-90. 1974.

HUI, G.; WANG, Y.; ZHANG, G.; ZHAO, Z.; BAI, C.; LIU, W. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests. **Forest Ecology and Management**, v. 422, p. 49-58, ago. 2018.

Ibá (2017). Anuário estatístico da IBA 2016: Ano base 2016. Brasília, Brasil.

JESUS, F. P. G. de. **Plantio de eucalipto no sul do estado do Tocantins: desafios e oportunidades**. 59 f. Trabalho de Graduação (Especialista em Gestão Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

KEDDY, P.A. **Competition**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p. 333-404. 2001.

LAND, S. B. Jr.; NANCE, W. L. Apa: a useful tool for analyses of progeny tests. In: SOUTHERN FOREST TREE IMPROVEMENT CONFERENCE, 19, College Station, 1987. **Proceedings**, New Orleans, SFES, p.300-11, 1987.

LEITE, F. P.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SANS, L. M. A.; FABRES, A. S. Relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 9-16, 1999.

LEMMON, P. E.; SCHUMACHER, F. X. Stocking density around ponderosa pine trees. **Forest Science**, v.8, p. 397–402, 1962.

- LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam v. 6, p. 343-360, 1983.
- MABVURIRA, D.; MIINA, J. Individual-tree growth and mortality models for *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.161, n. 1-3, p. 231-245, Mai. 2002.
- MARTINS, R. J.; SEIXAS, F. S.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um “harvester” trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 83, p. 253- 263, set. 2009.
- MIRANDA, D. L. C.; FRANCIO, J.; SANTOS, SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. Precisão e eficiência relativa de métodos de amostragem em teca. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 247-254, jul./set. 2015
- MIRANDA, R. O. V. de. **Modelagem de árvores individuais para povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- MONTEIRO, R. F. R.; CORDEIRO, J. A. Ensaio conjugado de espaçamento de métodos de desbastes em *Pinus elliottii* Engelm. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 361-363, 1983.
- MOORE, J. A.; BUDELSKY, C. A.; SCHLESINGER, R. C. A New Index Representing Individual Tree Competitive Status. **Canadian Journal Forest Research**, v. 3, n. 4, p. 495-500, 1973.
- MORAES, M. A; MORAES, S. M. B.; SILVA, E. C. B.; KUBOTA, T. Y. K.; SILVA, A. M.; RESENDE, M. D. V.; MORAES, M. L. T. Variação genética em progênies de *Jacaranda cuspidifolia* Mart. utilizando o delineamento sistemático tipo “leque”. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98. p.175-183, jun. 2013.
- MOSCOVICH, F. A; BRENA, D. A; LONGHI, S. J. Comparação de diferentes métodos de amostragem, de área fixa e variável, em uma floresta de *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.2, n.1, p. 173-191,1999.
- MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. DE C. O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.39, n.1, p.199-208, 2015.
- MUNRO, D. D. Forest growth model – a prognosis. In: Fries J (ed) Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forestry, Stockholm, p. 7–21, 1974.
- NAMKOONG, G. Application of Nelder’s designs in tree improvement research. In: SOUTHERN CONFERENCE ON FOREST TREE IMPROVEMENT, Savannah. **Proceedings...** Macon: SCFTI, p. 24-37, 1966.

- NASCIMENTO, R. G. M.; SILVA, L. C. R. da; BARBEIRO, L. da S. S.; WOJCIECHOWSKI, J. C.; PÉLLICO NETTO, S.; MACHADO, S. do A. Efeito da árvore marginal nos estimadores populacionais obtidos por métodos de amostragem de área variável. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 125-131, 2015.
- NELDER, J.A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, Washington, v.18, n.3, p. 283-307, set. 1962.
- NEWNHAM, R. M. The development of a stand model for Douglas fir. 201 f. Ph.D. thesis, University of British Columbia, 1964.
- ODA-SOUZA, M.; BARBIN, D.; RIBEIRO JR, P. J.; STAPE, J. L. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 499-509, mai/jun. 2008.
- OLIVEIRA NETO, S. N. DE; REIS, G. G. DOS; REIS, M. DAS G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região do cerrado de Minas Gerais. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 755-762, out./dez. 2010.
- OLIVEIRA, T. K. de; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M. Desempenho silvicultural e produtivo de Eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema Agrossilvipastoril. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.60, p. 01-09 Dez. 2009.
- PANETSOS, C. P. Selection of new poplar clones under various spacings. **Silvae Genetica** [s], n.29, p.130-135, 1980.
- PARROTT, D. L.; BRINKS, J. S.; LHOTKA, J. M. Designing Nelder wheel plots for tree density experiments. **New Forests**, v. 43, n. 2, p. 245-254, Mar. 2012.
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. Curitiba, 1997. 316 p.
- PÉLLICO NETTO, S., ORELLANA, E., STEPKA, T. F., LIMA, R., FIGUEIREDO FILHO, A. Comportamento probabilístico dos raios das sextas árvores no método de Prodan e estimativas dos parâmetros dendrométricos para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Ktze nativa. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 517-524, dez. 2012.
- PRODAN, M. **Forest biometrics**. Oxford, Pergamon Press, 1968. 447 p.
- PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura Forestal**. San José, Costa Rica: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1997. 561 p.
- REINEKE, L.H. Perfecting a stand-density index for even- aged forests. **Jornal Agriculture Research**, v. 46, p. 627–638, 1933.
- ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. **Canadian Journal Forest Research**, v. 27, p. 890-902, 1997.

SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; CORTE, A.P.D.; FERNANDES, L.A.V. **Inventários florestais: planejamento e execução**. Curitiba: UFPR, 2006.

SEMADES. Reformulação da política estadual de florestas e elaboração do plano estadual de florestas do Tocantins (PEF/TO). Palmas: Governo do Tocantins, 2014. Relatório Técnico.

SEPLAN - ATLAS do Tocantins: Subsídios ao Planejamento da Gestão Territorial. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública. Diretoria de Zoneamento Ecológico-econômico. Palmas, TO. 2012.

SPURR, S. H. A measure of point density. **Forest Science**, v. 8, p. 85–96, 1962

STAEBLER, G. R. **Growth and spacing in an even-aged stand of Douglas fir**. 46 p. PhD Thesis, University of Michigan, 1951.

STAPE, J. L. **Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

TEODORO, J. V. **Avaliações multivariada, geoestatística e de medidas repetidas e um experimento sob delineamento sistemático tipo “leque”**. 110 f. Tese (Doutorado em ciências) – Estatística e experimentação agrônômica. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.

UHL, E.; BIBER, P.; ULBRICHT, M.; HEYM, M.; HORVÁTH, T.; LAKATOS, F.; GÁL, J.; STEINACKER, L.; TONON, G.; VENTURA, M.; PRETZSCH, H. Analyzing the effect of stand density and site conditions on structure and growth of oak species using Nelder trials along and environmental gradient: experimental design, evaluation methods, and results. **Forest Ecosystems**. v. 5, p. 2-19, Dez. 2015.

VANCLAY, J. K. Experiment designs to evaluate inter- and intra-specific interactions in mixed plantings of forest trees. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 366-374. Set. 2006.

VANCLAY, J. K.; LAMB, D.; ERSKINE, P. D.; CAMERON, D. M. Spatially explicit competition in a mixed planting of *Araucaria cunninghamii* and *Flindersia brayleyana*. **Annals of Forest Science**, v. 70, n. 6, p. 611-619, 2013.

WEBER, P.; BUGMANN, H.; FONTI, P.; RIGLING, A. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession. **Forest Ecology and Management**, v.254, p.96-106, Jan. 2008.

WEISKITTEL, A. P; DAVID, W. H; JOHN A. KERSHAW, J. A. JR; JEROME K. VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Thomson Digital, Noida, India, 2011. 418 p.

YANG, T. R.; LAMA, T. Y.; KERSHAW JR, J. A.; Developing relative stand density index for structurally complex mixed species cypress and pine forests. **Forest Ecology and Management**, v. 409, p. 425–433, 2018.

ZANINE, A. de M; SANTOS, E. M. Competição entre espécies de plantas – uma revisão. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v.11, n.1, p. 10-30. 2004.

CAPÍTULO I

CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DE UM EXPERIMENTO FLORESTAL EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER

RESUMO

O delineamento sistemático de Nelder permite estudar o efeito de diferentes densidades no comportamento das variáveis de crescimento das árvores, entretanto, a falta de casualização neste delineamento pode ocasionar autocorrelação espacial entre as observações, dificultando a aplicação de estatísticas convencionais para sua avaliação. As hipóteses que fundamentaram o trabalho são: as variáveis diâmetro, altura e volume apresentam comportamento crescente com o aumento do espaçamento; existe autocorrelação espacial entre as árvores, devido à disposição delas nos diferentes espaçamentos. Os objetivos do trabalho foram: avaliar a relação entre as variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume com a área vital; caracterizar a estrutura das variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume, bem como a estrutura da distribuição diamétrica nos clones de *Eucalyptus spp.* sob influência de diferentes espaçamentos; verificar a autocorrelação e dependência espacial para as variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume e comparar os perfis médios das variáveis altura, diâmetro e volume entre os diferentes clones de eucalipto. Os dados utilizados no estudo são provenientes de um experimento com dez clones de eucalipto, distribuídos em nove círculos de Nelder, no norte do estado do Tocantins. A correlação entre as variáveis dendrométricas e a área vital foi avaliada por clone, utilizando a correlação de Spearman. A distribuição diamétrica foi ajustada aos dados dos diâmetros agrupados por idade. A autocorrelação foi avaliada utilizando o Índice de Moran I. Com a finalidade de comparar os diferentes clones, foi utilizada a análise de perfil multivariada, testando-os em cada círculo de Nelder. O comportamento médio das variáveis dendrométricas altura, diâmetro e volume, foi crescente com o aumento da área vital por planta, e nos maiores espaçamentos os valores dessas variáveis foram maiores. A estrutura diamétrica por classe de espaçamento mostra que o aumento da área vital por planta resulta em maior número de árvores nas maiores classes de diâmetro. A existência de dependência espacial foi observada nas variáveis diâmetro e altura. A análise de perfil multivariada permitiu verificar a interação entre os clones e o espaçamento, a diferença estatística entre os clones e o efeito do espaçamento no comportamento dos clones, mostrando-se uma análise eficiente para dados provenientes dos círculos de Nelder, que apresentem autocorrelação.

Palavras-chave: Eucalipto, Espaçamento, Autocorrelação, Análise de perfil.

CHAPTER I

CHARACTERIZATION OF THE BIOMETRIC VARIABLES OF A FOREST EXPERIMENT IN NELDER SYSTEMETIC DESIGN

ABSTRACT

The Nelder's systematic design allows the study of the effect of different densities on the behavior of tree growth variables; however, the lack of randomization of this design can cause spatial autocorrelation between observations, making it difficult to use conventional statistics for their evaluation. The hypotheses that substantiate the work are: the variables diameter, height and volume show increasing behavior with increasing spacing; there is spatial autocorrelation between the trees, due to their arrangement in the different spacings. The objectives of the study were: evaluate the relationship between the dendrometric variables diameter, height and volume with the vital area; characterize the structure of the dendrometric variables diameter, height and volume, as well as the structure of the diametric distribution in the clones of *Eucalyptus* spp. under the influence of different spacings; verify the autocorrelation and spatial dependence for the dendrometric variables diameter, height and volume and compare the average profiles of the variables height, diameter and volume among the different eucalyptus clones. The data used in the study come from an experiment with ten eucalyptus clones distributed in nine Nelder's circles in the northern state of Tocantins. The correlation between the dendrometric variables and the vital area was verified by clone using the Spearman correlation. The diametric distribution was performed by grouping the clones by age. The autocorrelation was verified using the Moran I Index. In order to compare the different clones, the multivariate profile analysis was used, by testing the clones in each Nelder's circle. The average behavior of the dendrometric variables height, diameter and volume increased with increasing vital area per plant, and in the larger spacings the values of these variables were higher. The diametric structure by spacing class demonstrates that the increase of the vital area per plant results in a greater number of trees in the larger diameter classes. The existence of spatial dependence was verified for the variables diameter and height. The multivariate profile analysis allowed to verify the interaction between the clones and the spacing, the statistical difference between the clones and the effect of the spacing on the behavior of the clones, showing an efficient analysis for data, coming from Nelder's circles, which present autocorrelation.

Key words: *Eucalyptus*, Spacing, Autocorrelation, Profile analysis.

1 INTRODUÇÃO

A densidade do povoamento é definida como o grau de aglomeração de árvores que crescem em uma determinada área. Em fases avançadas de desenvolvimento dos povoamentos, a elevada densidade de plantas locais pode causar competição por nutrientes, redução do crescimento da árvore ou até mesmo tombamento, resultando em auto desbaste (UHL et al., 2015). Em espaçamentos reduzidos, a disponibilidade de nutrientes para o crescimento é limitada, principalmente em plantios mais jovens, quando sua demanda é elevada, impondo redução na taxa de crescimento e o surgimento de árvores dominadas (OLIVEIRA NETO et al., 2010). No entanto, segundo Uhl et al. (2015), altas densidades também podem causar efeitos positivos no crescimento das plantas, pela redução da velocidade do vento e consequente diminuição da transpiração.

Diante disso, o espaçamento inicial do povoamento exerce importantes implicações na produtividade das árvores e na qualidade da madeira. Conhecer a produtividade é de interesse ecológico, pois reflete o quão eficiente a planta usa o recurso disponível em termos de área e também de interesse econômico, pois revela o rendimento florestal (UHL et al., 2015). Além disso, o planejamento florestal depende de grande quantidade de informações relacionadas às características de crescimento em diferentes condições de locais, práticas silviculturais e manejo florestal.

Devido à ampla gama e aumento gradual de espaçamentos a partir de um determinado ponto central, o delineamento sistemático de Nelder pode contribuir para se entender e identificar o nível de equilíbrio da densidade, especialmente onde o efeito passa a ser negativo. Além disso, segundo Gonçalves et al. (2008) o delineamento sistemático de Nelder oferece um desenho compacto e de simples abordagem, sendo útil para o desenvolvimento de estudos sobre os efeitos do espaçamento, quando novas áreas são incluídas para a gestão de plantações florestais, quando novos genótipos são introduzidos e quando inovações em silvicultura são desenvolvidas.

A relação entre o espaço vital disponível para as árvores com as variáveis de crescimento, como o diâmetro e a altura, foi relatada em alguns estudos (STAPE, 1995; ODA-SOUZA et al., 2008, STAPE E BINKLEY, 2010, AQUINO, 2018). Entretanto, é importante observar que espécies apresentam respostas diferentes ao espaçamento, assim como respondem diferentemente a mesmas condições de sítio (AQUINO, 2018). Com isso, uma questão que motivou o trabalho foi: *Qual o efeito do espaçamento no comportamento*

das variáveis diâmetro, altura e volume em delineamento sistemático de Nelder, com diferentes clones de eucalipto implantados no estado do Tocantins?

A falta de casualização no delineamento sistemático de Nelder dificulta o uso de análises convencionais para avaliá-lo estatisticamente. A independência dos dados não é garantida devido a não aleatoriedade do experimento, ao passo que a disposição das árvores nos espaçamentos em uma escala ordenada aumenta a possibilidade de autocorrelação. Essa característica deve ser considerada nas avaliações dos círculos de Nelder, pois ignorar o aspecto de autocorrelação viola hipóteses básicas dos métodos estatísticos clássicos e pode levar a resultados enviesados (UHL et al., 2015). Diante dessa dificuldade, torna-se importante utilizar outras opções de técnicas estatísticas, com o intuito de realizar análises precisas dos experimentos em delineamento sistemático de Nelder.

Uma alternativa para contornar o problema de autocorrelação é a análise multivariada de perfil, utilizada em análises com dados que apresentam autocorrelação devido a medições sequenciais no espaço ou em um determinado período de tempo. Essa análise é pouco utilizada na área florestal.

Assim, o trabalho tem como objetivos: *i)* Avaliar a relação entre as variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume com a área vital; *ii)* Caracterizar a estrutura das variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume dos clones de *Eucalyptus* spp. sob influência de diferentes espaçamentos; *iii)* Analisar a distribuição diamétrica das árvores sob diferentes espaçamentos. *iv)* Avaliar a autocorrelação e dependência espacial para as variáveis dendrométricas diâmetro, altura e volume; *v)* Comparar os perfis médios das variáveis altura, diâmetro e volume para os diferentes clones de eucalipto.

Os objetivos deste trabalho foram fundamentados nas hipóteses: *a)* O comportamento das variáveis dendrométricas altura, diâmetro e volume, apresenta variação nos diferentes espaçamentos, em que as árvores de maiores dimensões estão nos espaçamentos mais amplos, uma vez que a disponibilidade de nutrientes é maior; *b)* Existe autocorrelação espacial entre as árvores, devido à disposição delas nos diferentes espaçamentos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

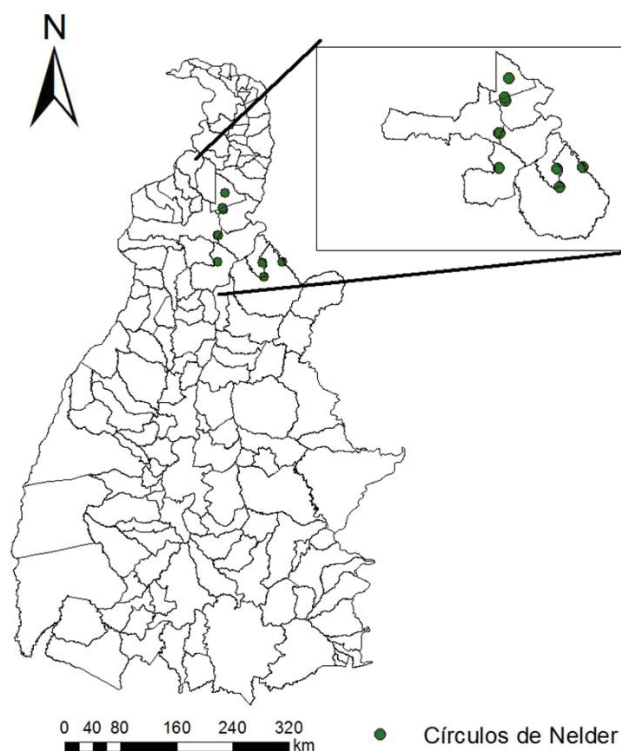
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados utilizados no estudo são provenientes de um experimento com dez clones de *Eucalyptus* spp., distribuídos em nove círculos de Nelder, localizados no norte do estado do Tocantins, BR (FIGURA 1). O experimento foi instalado no período de 2010 a 2014 pela empresa Eco Brasil Florestas.

A região onde o experimento está localizado é caracterizada por apresentar clima do tipo Aw tropical semi-úmido na classificação climática de Köppen, com temperaturas elevadas durante o ano, com mínima de 20° C e máxima de 32° C, apresentando uma estação definida de chuvas, entre os meses de outubro a maio, e uma estação seca, entre os meses de junho a setembro, com precipitação anual acima de 1.800 mm (SILVA JÚNIOR, 2016).

A vegetação predominante na região é característica de savana arbórea densa, savana arbórea aberta e savana parque. Apresenta vegetação xeromorfa aberta, dominada e delimitada por um estrato herbáceo e um tapete gramíneo-lenhoso, com uma composição florística heterogênea (PROJETO RADAM BRASIL, 1981).

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DOS CÍRCULOS DE NELDER UTILIZADOS NA PESQUISA NO ESTADO DE TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

2.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O delineamento utilizado na presente pesquisa tem o mesmo espaçamento entre as plantas ao longo do raio, não sendo necessário utilizar valores de razão da progressão geométrica (α) dos raios. Como valor do raio inicial é constante, a área do espaçamento foi calculada utilizando apenas este valor e a distância crescente entre arcos, delimitada pelo ângulo de abertura dos raios (θ). Por apresentarem essas características, os círculos de Nelder foram considerados uma adaptação, pois no delineamento sistemático original Nelder (1962) propôs que no arranjo experimental fossem definidos valores do raio inicial r_0 (distância do centro do círculo à bordadura interna), uma razão da progressão geométrica dos raios (α), o ângulo entre eles (θ) e a área (A_i) por planta.

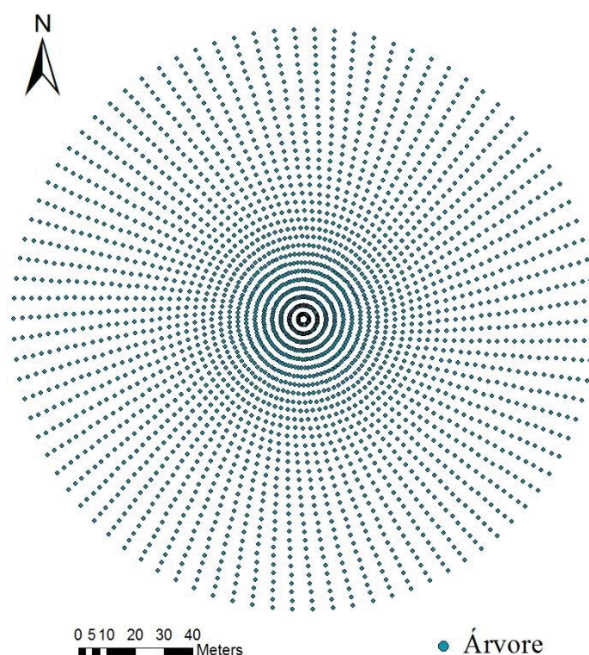
Os círculos de Nelder apresentam valor do ângulo entre os raios e números de raios diferentes (em média 94 raios), porém foram estabelecidos 34 arcos concêntricos (linhas) em todos os círculos (FIGURA 2 e 3). Na TABELA 1 estão apresentadas informações sobre cada círculo de Nelder referentes à idade, número de raios, valor do ângulo de abertura entre os raios, coordenadas geográficas centrais e município de localização.

A área individual por planta foi obtida utilizando a equação (1).

$$A_i = D_i D(e)_i \quad (1)$$

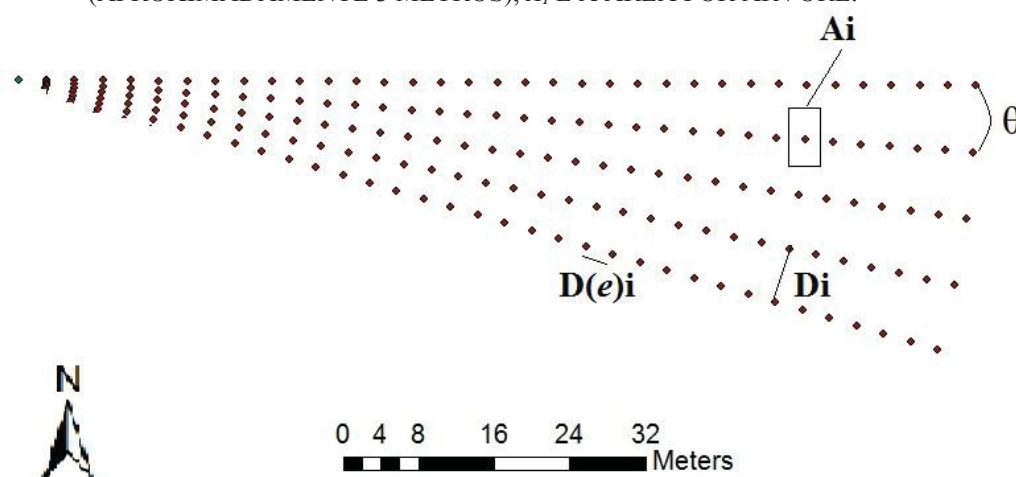
Em que: A_i é a área individual por planta; D_i é a distância das árvores entre dois raios, $D(e)_i$ é a distância entre as árvores no raio (aproximadamente 3 metros).

FIGURA 2 – CARACTERÍSTICAS DO DESENHO EXPERIMENTAL DO CÍRCULO DE NELDER ADAPTADO.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 3 – CARACTERÍSTICAS DO DESENHO EXPERIMENTAL DO CÍRCULO DE NELDER ADAPTADO. θ É O ÂNGULO DE ABERTURA ENTRE OS RAIOS, D_i É A DISTÂNCIA DAS ÁRVORES ENTRE DOIS RAIOS, $D_{(E)i}$ É A DISTÂNCIA DAS ÁRVORES NO RAIOS (APROXIMADAMENTE 3 METROS), A_i É A ÁREA POR ÁRVORE.



FONTE: O autor (2019).

TABELA 1– INFORMAÇÕES SOBRE OS CÍRCULOS DE NELDER UTILIZADOS NA PRESENTE PESQUISA.

Nelder	Idade (Anos)	Nº de Raios	Ângulo entre os raios (θ)	Coordenadas Geográficas		Município
				S	O	
1	4	90	4	6° 53' 40.64''	48° 00' 01.93''	Wanderlândia

2	5	91	3,95	7° 06' 37.38''	48° 01' 33.65''	Babaçulândia
3	3,81	106	3,39	7° 04' 54.84''	48° 01' 50.79''	Babaçulândia
4	2	97	3,71	7° 26' 29.16''	48° 05' 41.60''	Araguaína
5	2	90	4	7° 26' 22.38''	48° 05' 5.52''	Araguaína
6	3,73	96	3,75	7° 46' 49,50''	48° 05' 36.75''	Palmeirante
7	4	92	3,91	7° 47' 40.14''	47° 30' 58.50''	Barra do Ouro
8	3,78	88	4,09	7° 58' 22.69''	47° 29' 46.91''	Goiatins
9	3,81	90	4	7° 46' 31.75''	47° 15' 10.00''	Goiatins

FONTE: O autor (2019).

Os nove círculos de Nelder apresentam características de número de raios e valor do ângulo de abertura diferentes. Para minimizar essas diferenças, os tratamentos de espaçamentos foram separados em quatro classes. A descrição por classe está apresentada na TABELA 2.

TABELA 2 – CLASSES DE ESPAÇAMENTO DEFINIDAS DE ACORDO COM A ÁREA VITAL POR PLANTA, NO DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.

Classe	Descrição	Área vital
I	Muito adensado	Menor que 5,9 m ²
II	Adensado	6 m ² a 10,9 m ²
III	Pouco adensado	11 m ² a 15,9 m ²
IV	Não adensado	Maior que 16 m ²

FONTE: O autor (2019).

Os clones de eucalipto apresentam características distintas e estão organizados por letras. Foram implantados entre dois a quatro diferentes clones de eucalipto em cada círculo de Nelder e sua indicação de localização está apresentada na TABELA 3.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DOS CLONES E INFORMAÇÃO SOBRE SUA INCLUSÃO NOS CÍRCULOS DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.

Clone	Características	Nelder
A	Híbrido de <i>Urograndis</i> , clone de alta produtividade e média resistência à seca.	1, 6, 7
B	Híbrido de <i>Urograndis</i> , clone de alta produtividade e baixa resistência à seca e problemas fitossanitários em área baixa.	7, 8
C	Híbrido de <i>Urograndis</i> , clone de alta produtividade e média resistência à seca;	6, 7, 8, 9

D	Híbrido de <i>Urograndis</i> , alta produtividade e baixa resistência à seca;	2
E	Híbrido de <i>Urograndis</i> , alta produtividade e média resistência à seca;	2, 3, 6, 8, 9
F	Híbrido de <i>Urocam</i> , média produtividade e alta resistência à seca;	1, 2
G	Híbrido de <i>Urograndis</i> , alta produtividade, baixa resistência à seca e problemas fitossanitários em área baixa;	3, 8, 9
H	<i>Eucalyptus platyphylla</i> , média produtividade, alta resistência à seca e problemas fitossanitários em área baixa;	3, 4, 5
I	<i>Eucalyptus platyphylla</i> , média produtividade, alta resistência à seca;	3, 4, 5
J	Híbrido de <i>Urograndis</i> , alta produtividade e média resistência à seca.	6

FONTE: O autor (2019).

2.3 COLETA DOS DADOS

Os dados foram coletados no ano de 2016, quando os círculos de Nelder tinham de 2 a 5 anos de idade. Os círculos de Nelder apresentavam, em média, 94 raios e 2 a 4 clones, cada um deles distribuído aproximadamente entre 40 a 24 raios, porém, apenas 12 raios por clone tiveram as árvores mensuradas.

As variáveis dendrométricas mensuradas foram diâmetro à altura do peito (d), considerado a 1,30 m de altura do solo, altura da copa (hc) e altura total (h). O volume (v) das árvores foi obtido utilizando o modelo ajustado de Schumacher-Hall (2), o qual foi fornecido pela empresa que conduziu os experimentos.

$$v = 0,000044487 d^{1,73714816} h^{1,17608127} \quad (2)$$

Em que: v = volume total (m^3); d = diâmetro a 1,3 m do solo (cm); h é a altura total (m).

2.4 ANÁLISE DOS DADOS

2.4.1 Análise de correlação

A relação entre o crescimento das variáveis diâmetro, altura e volume com a área vital por planta foi observada por clone nas diferentes idades, utilizando a matriz de correlação. Os dados foram submetidos à análise de normalidade pelo teste de Kolmogorov-

Smirnov a 95% de probabilidade, e as variáveis que não atenderam a hipótese de normalidade foram transformadas com a função de *Box-Cox* (1964).

Mesmo utilizando a técnica de transformação dos dados, o pressuposto de normalidade não foi atendido, com isso foi utilizada a matriz de correlação de Spearman. Além da correlação, a descrição gráfica foi utilizada para visualizar o comportamento das variáveis dendrométricas nas classes de espaçamento.

Os resultados dos coeficientes de correlação de Spearman significam que valores positivos ou negativos entre 0 e 0,19 apresentam correlação bem fraca. Entre 0,20 a 0,39 apresentam correlação fraca. Já entre 0,4 a 0,69 a correlação é moderada. Entre 0,7 a 0,89 a correlação é considerada forte. Acima de 0,9 a correlação é muito forte (SIEGEL, 1975).

2.4.2 Distribuição diamétrica

Os dados de diâmetro observados nos diferentes clones foram agrupados por idade para verificar a configuração diamétrica nas diferentes classes de espaçamento. O número de classes diamétricas foi definido utilizando a formulação matemática de Sturges (3).

$$k = 1 + 3,322 \cdot \log_{10} n \quad (3)$$

Em que: k é o número de classes; n é o número de árvores na classe de espaçamento.

A função densidade de probabilidade Normal foi testada para a obtenção das estimativas das frequências para cada classe de espaçamento, visando verificar sua aderência aos dados observados. Os coeficientes foram ajustados pelo método de máxima verossimilhança, com auxílio do *software* Table Curve 2d.

O ajuste do modelo da distribuição normal foi avaliado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, que compara a máxima diferença entre a frequência observada acumulada e a frequência estimada acumulada, dividida pelo número de observações (Equação 4). Esse valor calculado foi comparado a um valor tabelado a 5% de probabilidade (Equação 5), e se $D_{cal} < D_{tab}$ aceita-se a hipótese H_0 de que os diâmetros observados seguem a distribuição normal, caso contrário rejeita-se a hipótese H_0 e assume-se que os diâmetros não seguem a distribuição normal.

$$D_{cal} = \frac{\max F_o(x) - F_e(x)}{n} \quad (4)$$

Em que: $F_o(x)$ é frequência observada acumulada; $F_e(x)$ é frequência estimada acumulada; n é o número de observações.

$$D_{tab} = \frac{1,35}{n} \quad (5)$$

Em que: D_{tab} é o valor crítico a nível de 5% de probabilidade; n é o número de observações.

2.3.3 Autocorrelação

Para verificar a ocorrência de autocorrelação e dependência espacial das variáveis dendrométricas diâmetro (d), altura (h) e volume (v) nas diferentes idades, foram estruturados correlogramas baseados no índice estatístico I de Moran, com auxílio do *Software* Gs+.

Os valores deste índice variam de -1 a 1, em que os valores positivos indicam associação espacial positiva entre os locais (similaridade) e valores negativos indicam associação negativa (dissimilaridade). Valores em torno de 0, dentro dos envelopes de completa aleatoriedade, indicam distribuição aleatória sem associação espacial (MORAN, 1950).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}$$

Em que: n é o número de observações; w_{ij} são os pesos atribuídos conforme a conexão entre as observações i e j ; z_i é o valor do atributo considerando a observação i ; z_j valor do atributo considerando a observação j ; \bar{z} é o valor médio das observações.

2.3.4 Análise multivariada de perfil

Para testar a diferença de crescimento dos clones nos distintos espaçamentos foi utilizada a análise de perfil multivariada, dado que as árvores presentes no delineamento sistemático de Nelder possivelmente apresentam autocorrelação, consequência da não casualização e da obtenção dos dados nos espaçamentos em uma escala crescente.

A análise foi realizada comparando-se os clones em cada círculo de Nelder, uma vez que a localização e a idade de cada círculo de Nelder são diferentes. As variáveis de respostas utilizadas foram: altura, diâmetro e volume. De maneira sistemática, buscando abranger os diferentes espaçamentos, quatro amostras foram selecionadas por clone, distribuídas nas classes de espaçamento. Cada amostra foi composta por três repetições, no mesmo espaçamento.

Três hipóteses de interesse estão associadas e foram testadas na análise de perfil:

$H_0^{(1)}$ - Os perfis médios de resposta correspondentes aos diversos tratamentos são paralelos. Não existe interação Clones x Espaçamentos;

$H_0^{(2)}$ – Os perfis médios de resposta correspondentes aos tratamentos são coincidentes. Não existe efeito dos clones;

$H_0^{(3)}$ – Os perfis médios de resposta correspondentes aos clones são paralelos ao eixo das abscissas. Não existe efeito do espaçamento.

O teste de Wilks lambda (λ) a 95% de probabilidade foi utilizado para avaliar as três hipóteses quando analisados três ou mais clones. Para avaliar a significância desse teste o valor de λ foi transformado num valor correspondente a F, e foi utilizada a tabela F para avaliação de significância. Se $F_{cal} < F_{tab}$ aceita-se as hipóteses $H_0^{(1)}$, $H_0^{(2)}$ e $H_0^{(3)}$, caso contrário são rejeitadas.

Para se avaliar dois clones foi utilizado o teste de Hotelling (T^2) para as hipóteses $H_0^{(1)}$ e $H_0^{(3)}$, comparando o valor calculado com o valor da tabela de Hotelling (T^2). Para a hipótese $H_0^{(2)}$, foi utilizado o teste t, conforme descrito por Rencher (1934).

Os *softwares* utilizados foram o SAS (SYSTEM ANALYSIS STATISTICAL INSTITUTE) na versão Studio, com a função proc GLM. Essa requer que os dados sejam completos nas unidades experimentais, não havendo parcelas perdidas. Para fazer a análise entre dois clones foi utilizado o *software* Matlab.

A homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Bartlett a 95% de probabilidade. Para ajustar os dados às pressuposições do modelo, foi utilizada a transformação *log* para as variáveis dendrométricas altura, diâmetro e volume quando necessário.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CORRELAÇÃO E CRESCIMENTO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

Os valores dos coeficientes de correlação de Spearman entre as variáveis dendrométricas altura, diâmetro e volume com a área vital por planta estão apresentados na TABELA 4. O diâmetro apresentou os maiores valores de correlação com a área vital, variando de forte (0,88) a moderado (0,40). Em seguida, a variável volume foi fortemente correlacionada com a área vital, cujos valores dos coeficientes variaram de forte (0,85) a fraco (0,32). A correlação entre as variáveis diâmetro e volume e a área vital foi significativa para todos os clones e apresentaram valores positivos, indicando a tendência crescente dessas variáveis com o aumento da área vital.

A variável altura apresentou correlação moderada a bem fraca (0,68 a 0,006), e teve maior correlação na idade de dois anos. Os clones presentes no círculo de Nelder 9 (E, C e G) e o clone E (N3), com três anos de idade resultaram em coeficiente de correlação não significante. Os clones A (N6) e E (N6), com três anos e meio, e os clones A (N7) e C (N7) com quatro anos, também não resultaram em valores significantes de correlação entre a variável altura e a área vital.

Os maiores valores de correlação foram observados na idade de dois anos para as três variáveis, indicando que nessa idade o crescimento das variáveis diâmetro, altura e volume se relaciona melhor com o espaçamento.

TABELA 4 – VALORES DA CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME COM A ÁREA VITAL PARA OS CLONES DE EUCALIPTOS, NAS DIFERENTES IDADES E CÍRCULOS DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.

Idade (Anos)	Clone	h (m)	d (cm)	v (m ³)
		x Área vital (m ²)	x Área vital (m ²)	x Área vital (m ²)
2	H (N4)	0,68*	0,88*	0,85*
	H (N5)	0,48*	0,76*	0,72*
	I (N4)	0,66*	0,79*	0,78*
	I (N5)	0,65*	0,82*	0,80*
3	E (N3)	-0,04 ^{ns}	0,53*	0,41*
	G (N3)	0,35*	0,54*	0,50*
	H (N3)	0,50*	0,58*	0,56*
	I (N3)	0,42*	0,78*	0,72*
	C (N9)	0,13 ^{ns}	0,40*	0,33*
	E (N9)	0,08 ^{ns}	0,53*	0,43*
	G (N9)	0,07 ^{ns}	0,53*	0,42
3,5	C (N8)	0,40*	0,65*	0,62*
	B (N8)	0,23*	0,68*	0,62
	E (N8)	0,48*	0,58*	0,55*
	G (N8)	0,40*	0,65*	0,60*
	A (N6)	-0,09 ^{ns}	0,45*	0,32*
	C (N6)	0,38*	0,52*	0,49*
	E (N6)	0,18 ^{ns}	0,64*	0,58
	J (N6)	0,30 *	0,53*	0,50
4	A (N1)	-0,41 *	0,48*	0,29*
	A (N7)	0,006 ^{ns}	0,57*	0,51*
	B	0,12 ^{ns}	0,44*	0,35*
	C	0,15 ^{ns}	0,47*	0,39*
	F	0,58*	0,62*	0,61*
5	D	0,5 *	0,67*	0,65*
	E	-0,3*	0,64*	0,44*
	F	0,56*	0,69*	0,69*

FONTE: O autor (2019).

Em que: * significante a 95% de probabilidade; ns não significante a 95% de probabilidade.

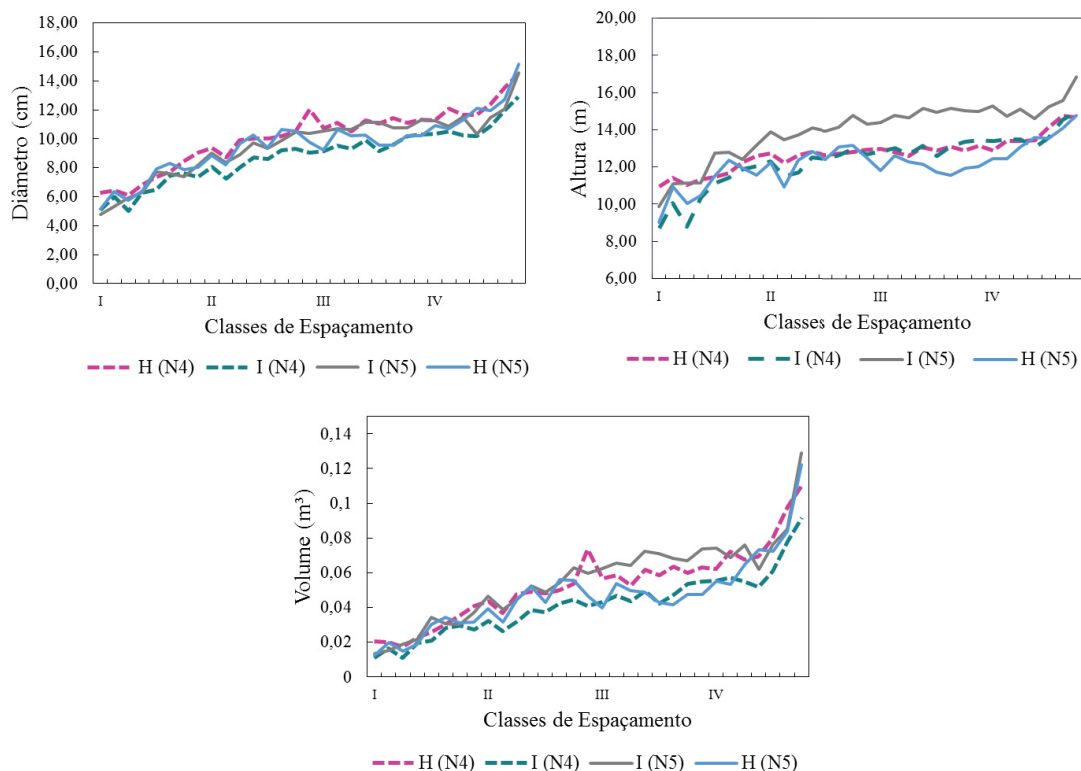
Em geral, os clones de eucalipto apresentaram comportamento médio crescente das variáveis diâmetro, volume e altura com o aumento da área vital por planta, ocorrendo variações das dimensões das árvores nos diferentes espaçamentos (FIGURA 4, 5, 6, 7 e 8). Esses resultados corroboram com os encontrados por outros autores para a espécie (BERGER et al. 2002; STAPE E BINKLEY, 2010; MOULIN et al., 2017).

A altura foi a variável que apresentou menor variação com o aumento do espaçamento. Esse comportamento e os valores inferiores de correlação em comparação com as variáveis diâmetro e volume confirmam a teoria da densidade de indivíduos, em que o crescimento em altura é relativamente pouco afetado pela densidade (DANIEL et al., 1979). Segundo Oliveira Neto et al. (2010), o crescimento em altura é menos influenciado pelo espaçamento, podendo variar de acordo com a qualidade do local e a idade de avaliação.

Hummel (2000), ao estudar as respostas da espécie *Cordia alliodora* em diferentes densidades na Costa Rica, também constatou que a altura total para essa espécie não estava relacionada à densidade, mas o diâmetro apresentou relacionamento inverso à densidade das árvores. Teodoro (2016) mencionou que as árvores de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub apresentaram maior altura em áreas menores, enquanto as variáveis diâmetro e volume apresentaram a tendência de valores mais elevados nas maiores áreas, em delineamento sistemático de Nelder.

Os clones com dois anos de idade resultaram em valores médios próximos entre si e comportamentos semelhantes nos diferentes espaçamentos para as variáveis diâmetro, volume e altura (FIGURA 4). O diâmetro médio por espaçamento nessa idade variou de aproximadamente 5 cm a 15 cm, enquanto a altura apresentou pouca variação nas classes de espaçamento, porém nos menores espaçamentos apresentou em média 10 m de altura, observando-se valores maiores conforme aumento do espaçamento, atingindo 15 m nos maiores espaçamentos.

FIGURA 4- COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME INDIVIDUALEM DIFERENTES ÁREAS, PARA OS CLONES DE EUCALIPTO COM DOIS ANOS DE IDADE, IMPLANTADOS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.

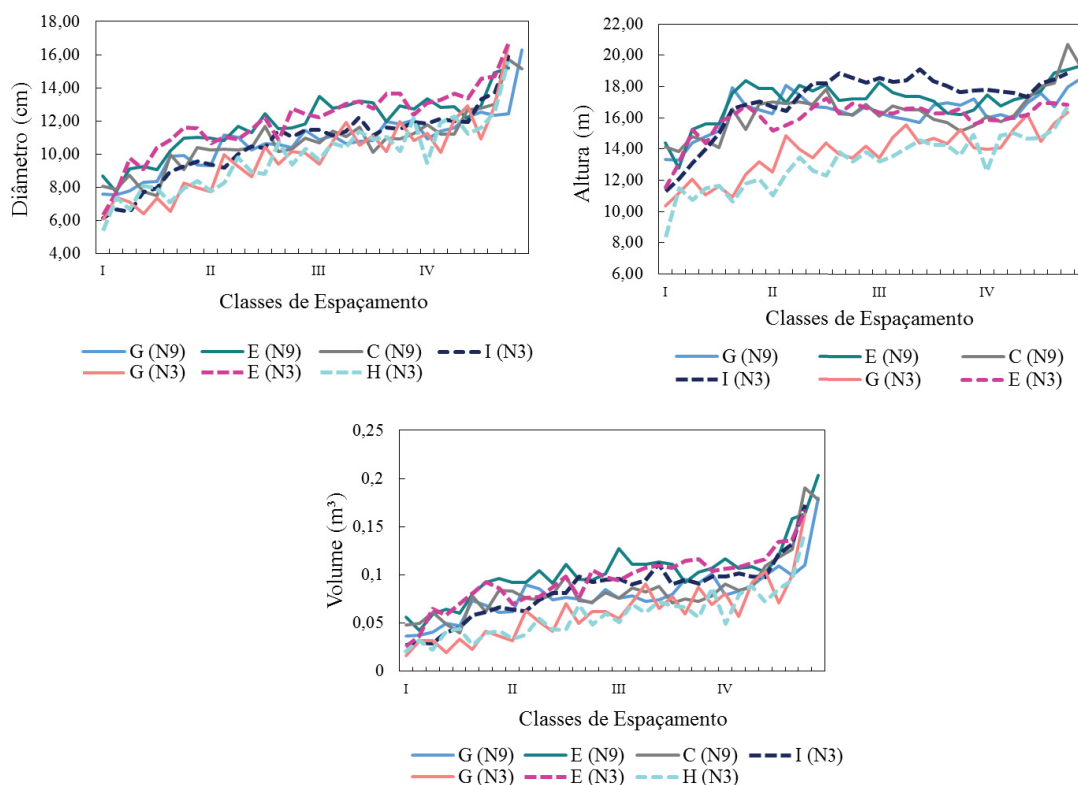


FONTE: O autor (2019).

Os clones com idade de três anos apresentaram comportamento distintos entre si nos diferentes espaçamentos, formando linhas crescentes com picos que diminuem e aumentam nos diferentes espaçamentos. Essa tendência é observada também para os clones com três anos e meio, quatro e cinco anos de idade. Segundo Stape et al. (2010), esses padrões de pico de crescimento em relação ao espaçamento não substanciam explicação sobre o declínio do crescimento em função do aumento de espaçamento. Esse comportamento pode ser influenciado pelas características genéticas, capacidade produtiva do local e mortalidade.

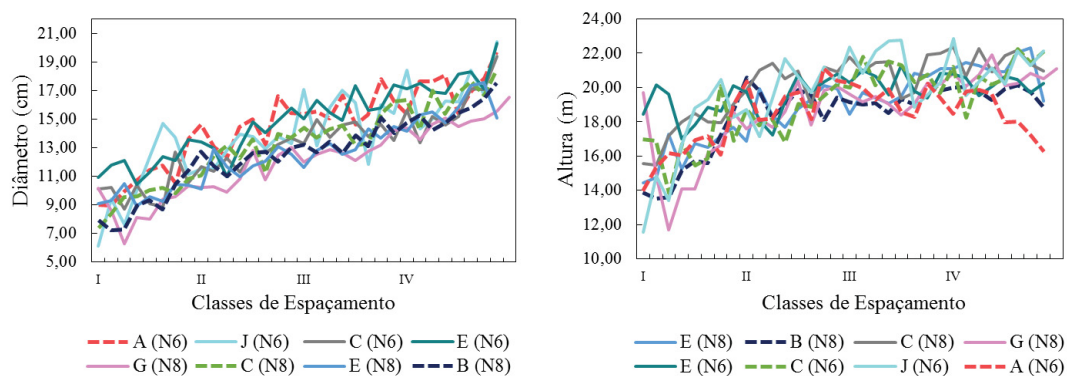
O clone E, presente nos círculos de Nelder 3 e 9 com três anos de idade, apresentou valores médios para diâmetro e volume ligeiramente superiores aos demais clones nessa idade. Os clones do círculo de Nelder 9 (C, E, G) foram os que apresentaram menos mudanças ao longo da área para a variável altura, justificando a ausência de correlação entre a área vital e a altura para esses clones (FIGURA 5). Nessa idade, os valores de diâmetro foram semelhantes aos valores apresentados pelos clones com dois anos de idade, variando de 5 cm a 15 cm. Já os clones com três anos e meio, quatro e cinco anos variaram, em média, de 5 cm a 20 cm de diâmetro.

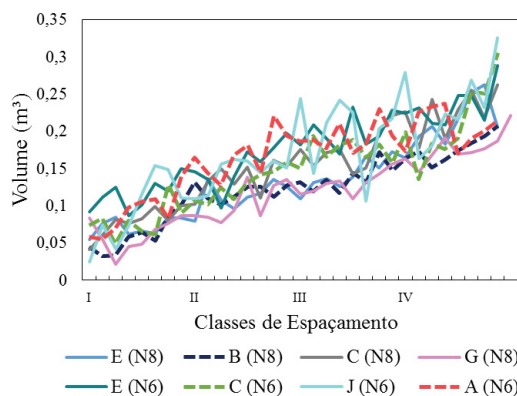
FIGURA 5 - COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME EM DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DE EUCALIPTO COM TRÊS ANOS DE IDADE, IMPLANTADO EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 6 - COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME EM DIFERENTES ÁREAS, PARA OS CLONES DE EUCALIPTO COM TRÊS ANOS E MEIO DE IDADE, IMPLANTADO EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.

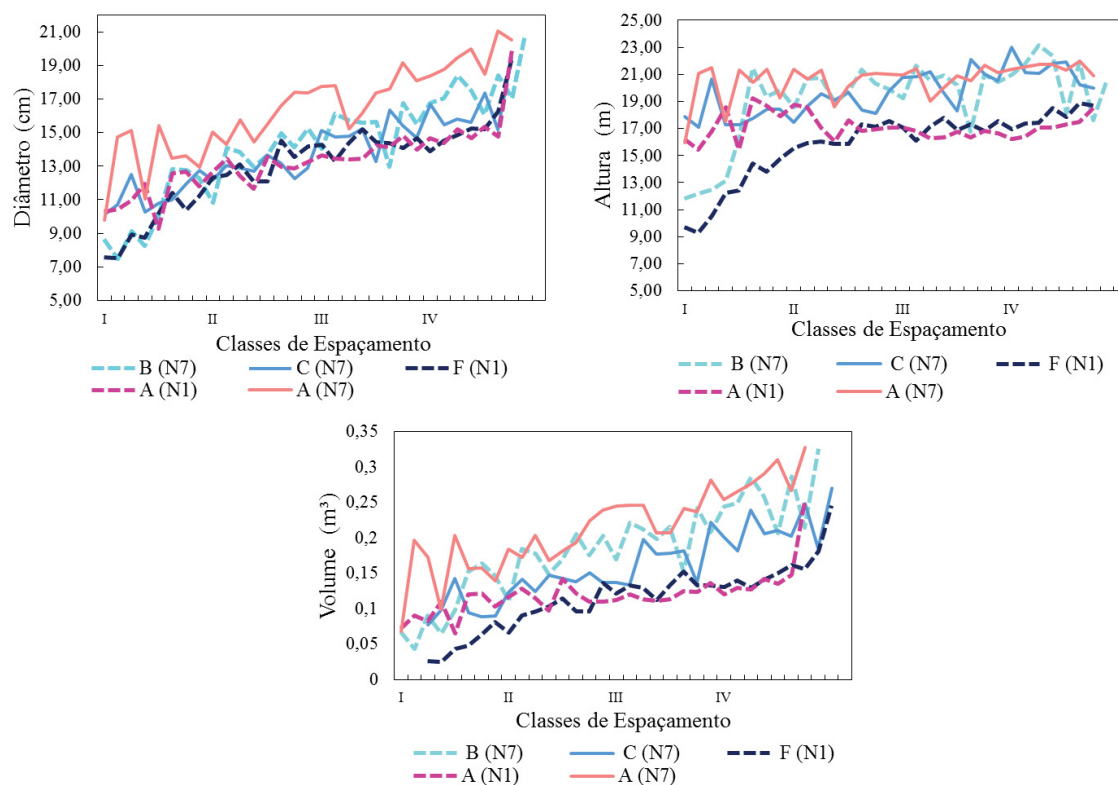




FONTE: O autor (2019).

Os clones do círculo de Nelder 1, F (N1) e A (N1), com quatro anos, apresentaram valores ligeiramente inferiores aos clones presentes no círculo de Nelder 7, que possuem a mesma idade. O clone A (N7) apresentou valores superiores aos demais nessa idade (FIGURA 7).

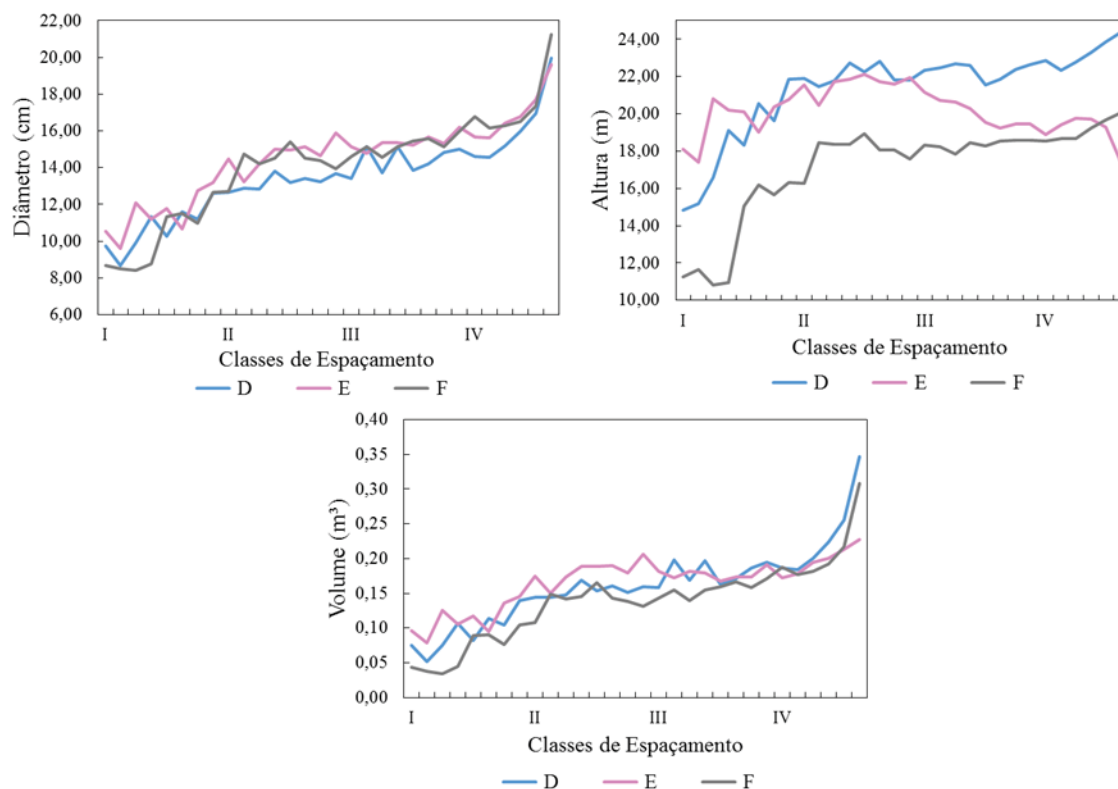
FIGURA 7 - COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME EM DIFERENTES ÁREAS, PARA OS CLONES DE EUCALIPTO COM QUATRO ANOS DE IDADE, IMPLANTADOS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

Os clones com cinco anos de idade presentes no círculo de Nelder 2 apresentaram valores semelhantes entre si, porém crescentes para o maior espaçamento. O clone F apresentou valores inferiores de altura (FIGURA 8).

FIGURA 8 - COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME EM DIFERENTES ÁREAS, PARA OS CLONES DE EUCALIPTO COM CINCO ANOS DE IDADE, IMPLANTADOS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

3.2 DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA

A estrutura diamétrica para os clones de eucalipto foi semelhante nas diferentes idades, dado que com o aumento da área vital por planta ocorreu maior número de árvores nas maiores classes de diâmetro. A classe de espaçamento I, apresentou maior quantidade de indivíduos nas menores classes de diâmetros (FIGURAS 9, 10, 11, 12 e 13). A classe I apresenta também menor quantidade de indivíduos que as demais classes de espaçamento. O menor tamanho de árvores em locais com elevada densidade populacional decorre do fato de que as plantas são submetidas a uma intensa competição entre os seus vizinhos mais cedo do que as sob baixas densidades populacionais (RADOSEVICH e OSTERYOUNG, 1987).

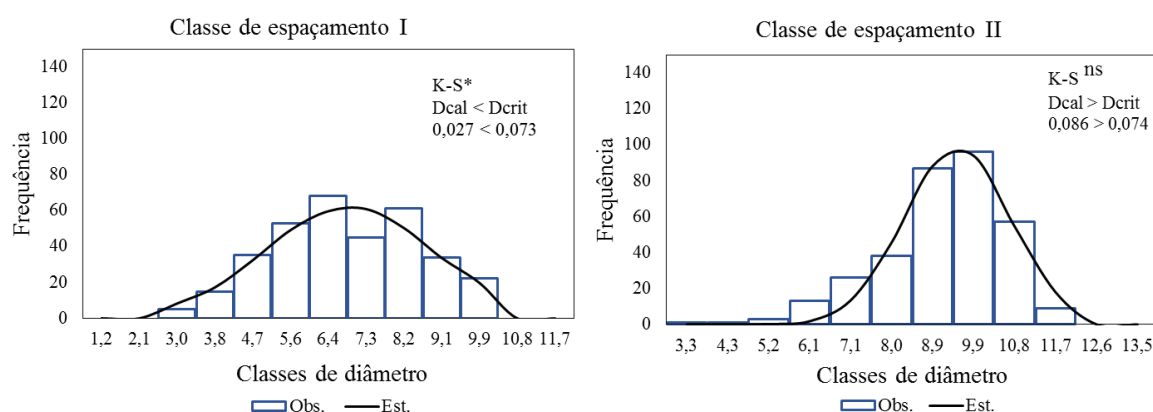
Para a idade de dois anos foi observada ausência de indivíduos com diâmetro superior a 10 cm na classe de espaçamento I. As classes de espaçamento II, III e IV resultaram em

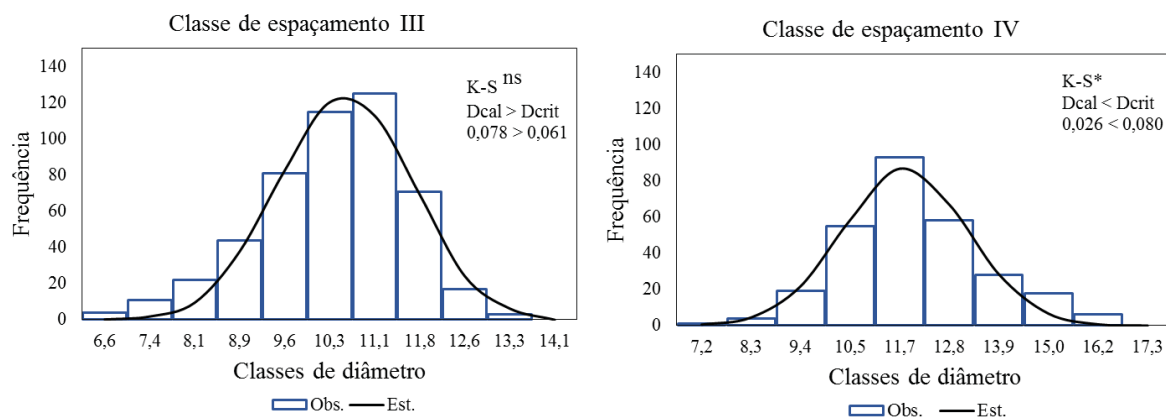
maior concentração de indivíduos nas maiores classes de diâmetro e nas classes de espaçamento II e III a distribuição normal apresentou aderência (FIGURA 9). Na idade de três anos a distribuição diamétrica de todas as classes de espaçamento não aderiram à distribuição normal (FIGURA 10). Já na idade de três anos e meio as classes II e IV aderiram a distribuição normal (FIGURA 11).

Nas idades mais avançadas, quatro e cinco anos, a frequência de árvores na classe de espaçamento I foi baixa, ocorrendo um “achatamento” nas classes de diâmetro. Na idade de cinco anos essa característica é mais evidente, em que as classes de diâmetro apresentaram frequências semelhantes (FIGURA 13). Na idade de 4 anos não houve aderência à distribuição normal em todas as classes de espaçamento. Na idade de 5 anos ocorreu aderência apenas na classe IV (FIGURA 12).

Esses resultados corroboram com os encontrados por Oliveira Neto et al. (2010), quando estudando o crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região do cerrado em Minas Gerais. Eles observaram que nos maiores espaçamentos ocorreu maior número de indivíduos pertencentes às maiores classes de diâmetro. Lima (2018) encontrou resultados de maior ritmo de crescimento nos maiores espaçamentos ao estudar a distribuição diamétrica de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* nas idades de 8 a 36 meses em delineamento sistemático de Nelder.

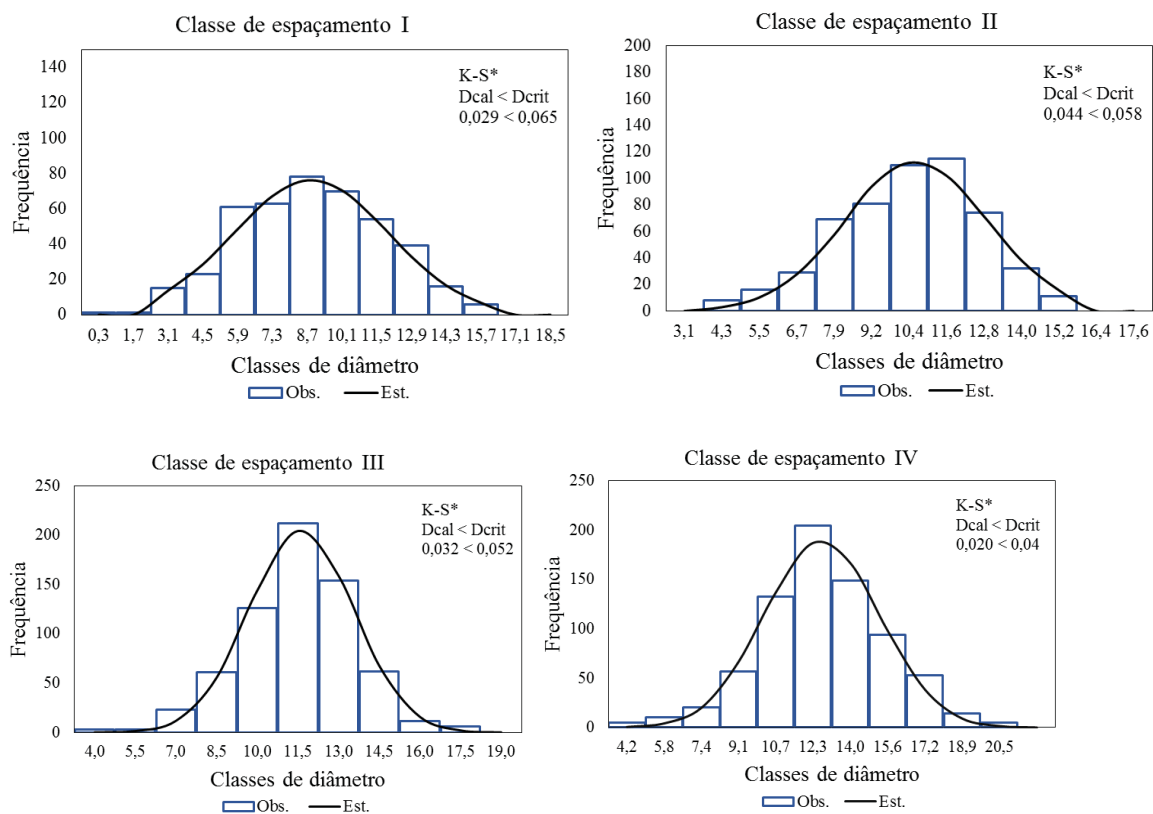
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA PARA AS ÁRVORES COM IDADE DE DOIS ANOS NAS DIFERENTES CLASSES DE ESPAÇAMENTOS, EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.





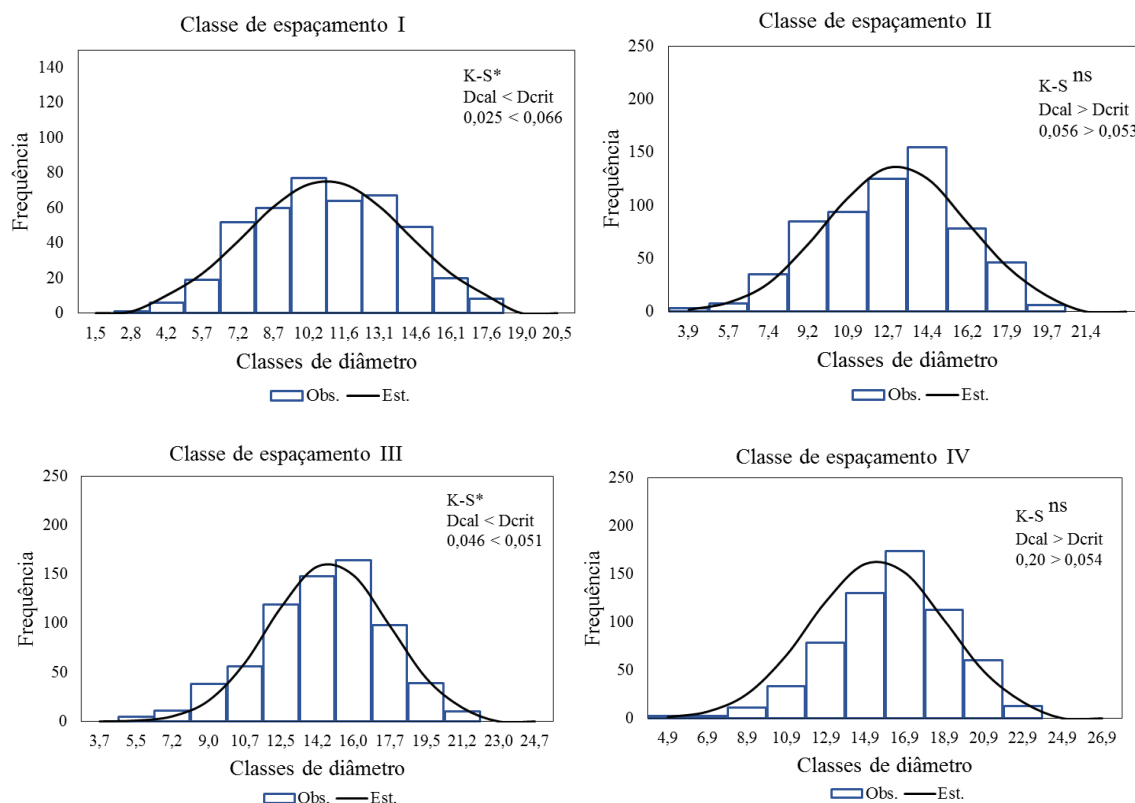
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 10 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA PARA AS ÁRVORES COM IDADE DE TRÊS ANOS NAS DIFERENTES CLASSES DE ESPAÇAMENTO, EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.



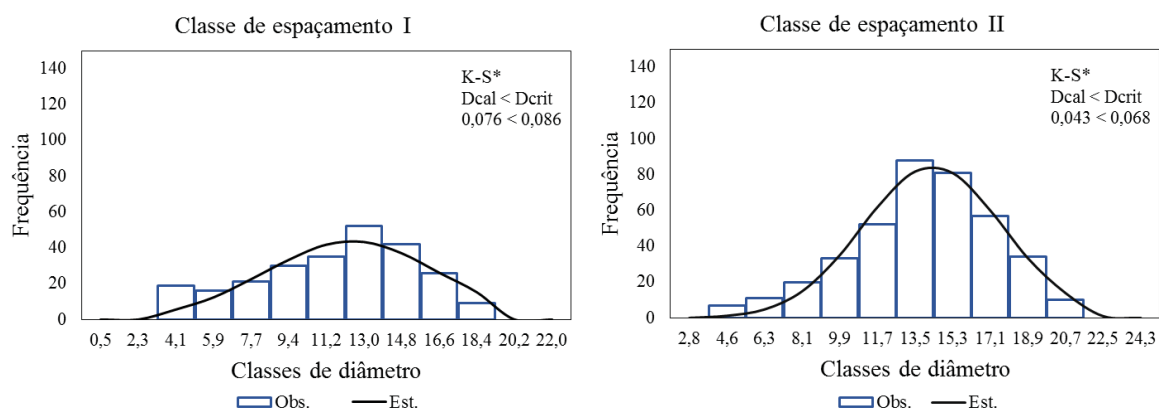
FONTE: O autor (2019).

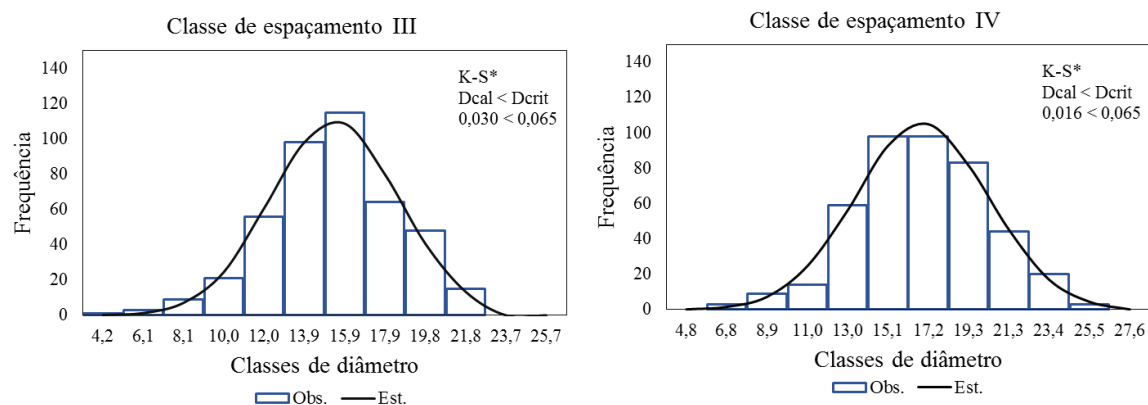
FIGURA 11 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA PARA AS ÁRVORES COM IDADE DE TRÊS ANOS E MEIO NAS DIFERENTES CLASSES DE ESPAÇAMENTO, EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

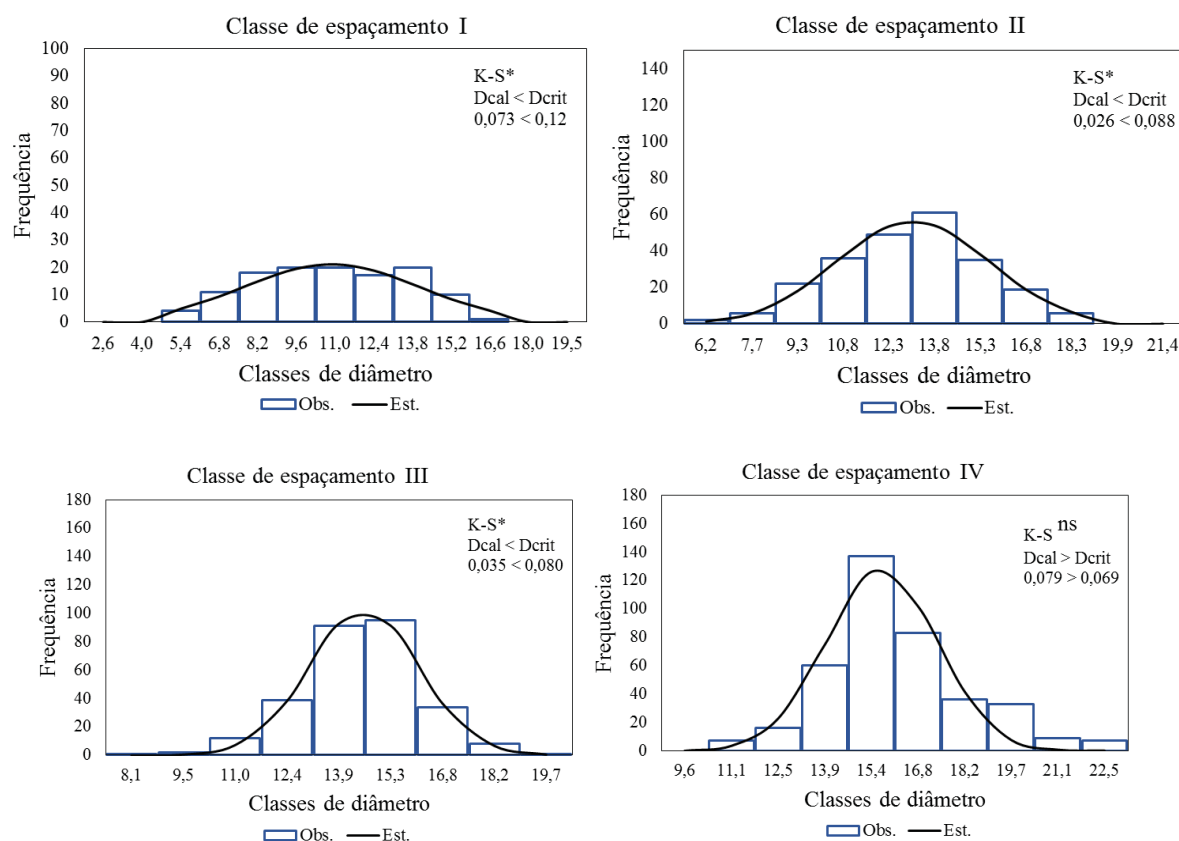
FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA PARA AS ÁRVORES COM IDADE DE QUATRO ANOS NAS DIFERENTES CLASSES DE ESPAÇAMENTO, EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.





FONTE: O autor (2019).

FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA PARA AS ÁRVORES COM IDADE DE CINCO ANOS NAS DIFERENTES CLASSES DE ESPAÇAMENTO, EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

3.3 AUTOCORRELAÇÃO

As variáveis em estudo: diâmetro, altura e volume apresentaram os valores dos índices de Moran I dispersos nas regiões positiva e negativa em função da distância, indicando, dessa maneira, a dependência espacial entre as árvores e confirmando autocorrelação entre seus sucessivos valores (FIGURAS 14, 15, 16, 17 e 18).

Do ponto de vista estatístico, a autocorrelação espacial deve ser considerada em uma avaliação de círculos de Nelder, pois dependendo de sua distância, as medidas em diferentes plantas podem não ser estatisticamente independentes. Isso impossibilita o uso de análises estatísticas clássicas e, se a autocorrelação não for considerada, pode levar a resultados equivocados (UHL et al., 2015).

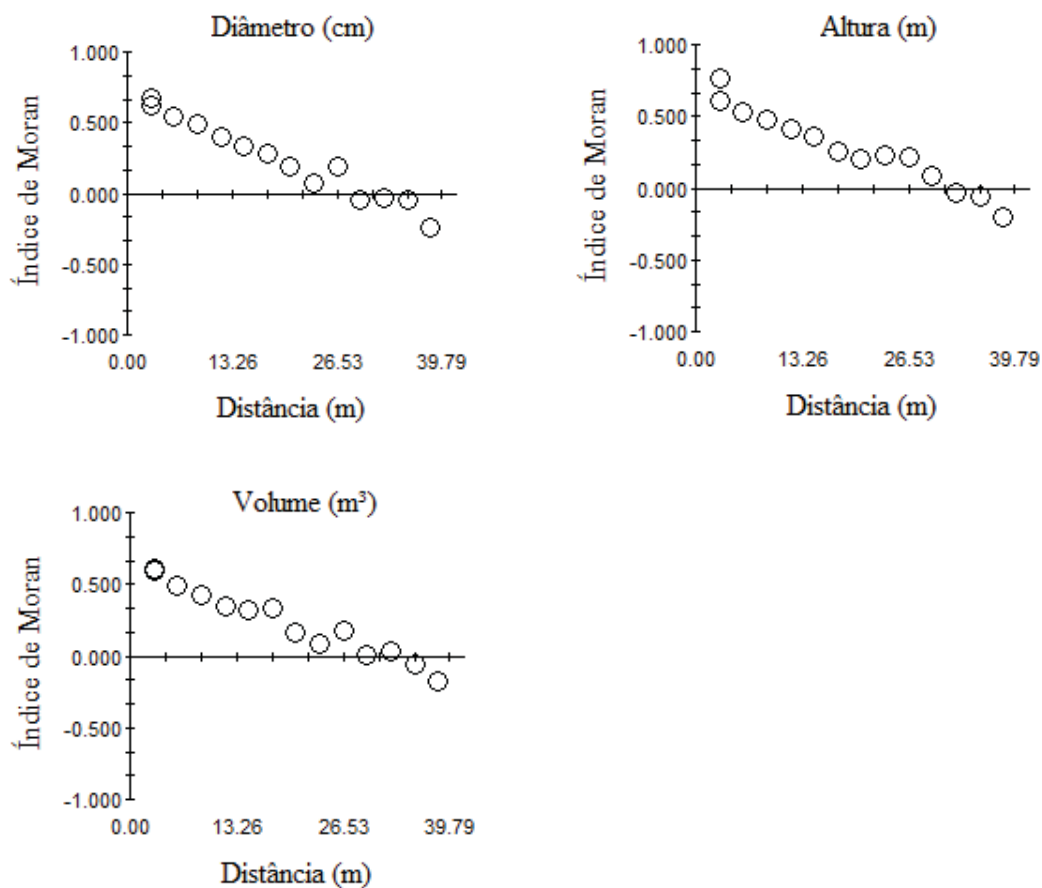
Diferentes distâncias entre árvores podem determinar a forma e a magnitude da dependência espacial, quando as árvores mais próximas estão presentes no mesmo micro-local tendem a apresentar dependência espacial, enquanto que nas maiores distâncias essa realidade não é observada (FOX et al., 2007).

Segundo Fox et al. (2001), grande parte da dependência espacial observada entre árvores pode ser explicada pelo estágio de desenvolvimento do povoamento, que depende de dois fatores: competição e variação de micro-locais. As árvores jovens apresentam inicialmente menor competição, sendo, portanto, mais influenciada pelo micro-local. À medida que inicia a competição, as árvores passam a sofrer o efeito desse fator e a dependência espacial diminui. Após o período de intensa competição, a mortalidade natural reduz os efeitos competitivos e os atributos das árvores individuais voltam a ser uma expressão das influências do micro-local, podendo ocorrer novamente a dependência espacial (FOX et al., 2007).

Corroborando com os resultados da dependência espacial na idade de dois anos, Teodoro (2016) encontrou dependência espacial para as variáveis altura aos 6, 13, 25 e 37 meses após o plantio e diâmetro aos 13, 25 e 37 meses após o plantio para a espécie *Canafistula* (*Peltophorum dubium*) em delineamento sistemático de Nelder.

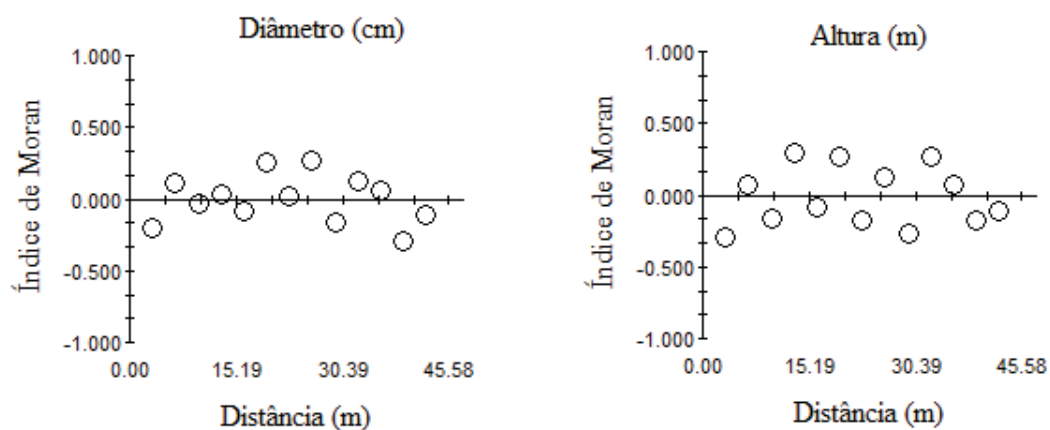
Aquino (2017) não observou dependência espacial aos dois anos de idade em um delineamento sistemático de Nelder com clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Oda - Souza (2005) encontrou dependência espacial fraca para dados de volume de *Eucalyptus dunnii* Maiden em delineamento sistemático de Nelder, o que não justificaria considerá-la com aplicação de um modelo geoestatístico.

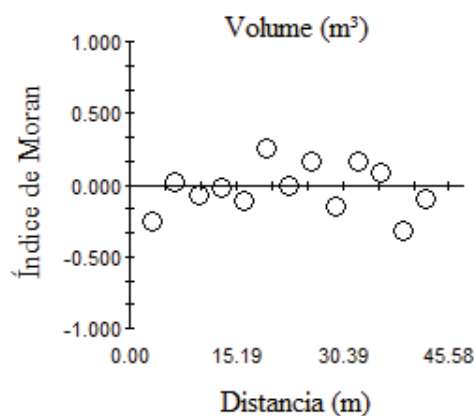
FIGURA 14 – CORRELOGRAMAS DAS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME PARA A IDADE DE DOIS ANOS, PARA CLONES DE EUCALIPTUS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

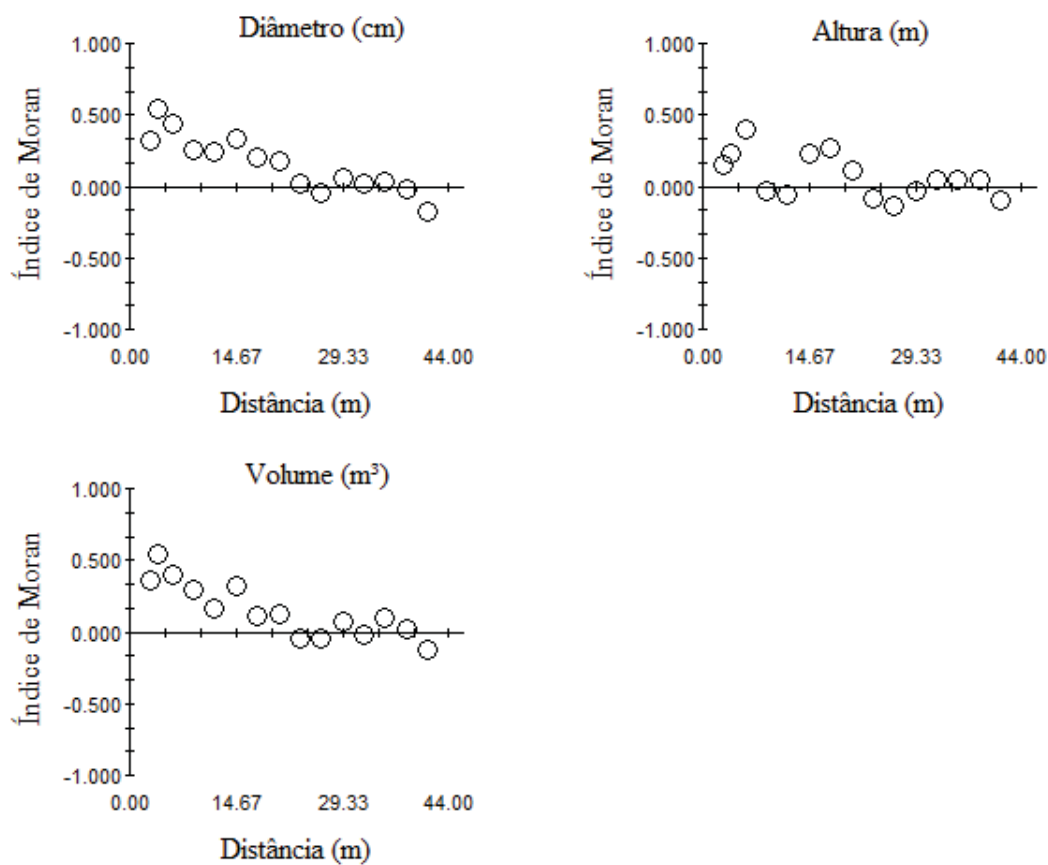
FIGURA 15 – CORRELOGRAMAS DAS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME PARA A IDADE DE TRÊS ANOS, PARA CLONES DE EUCALIPTUS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.





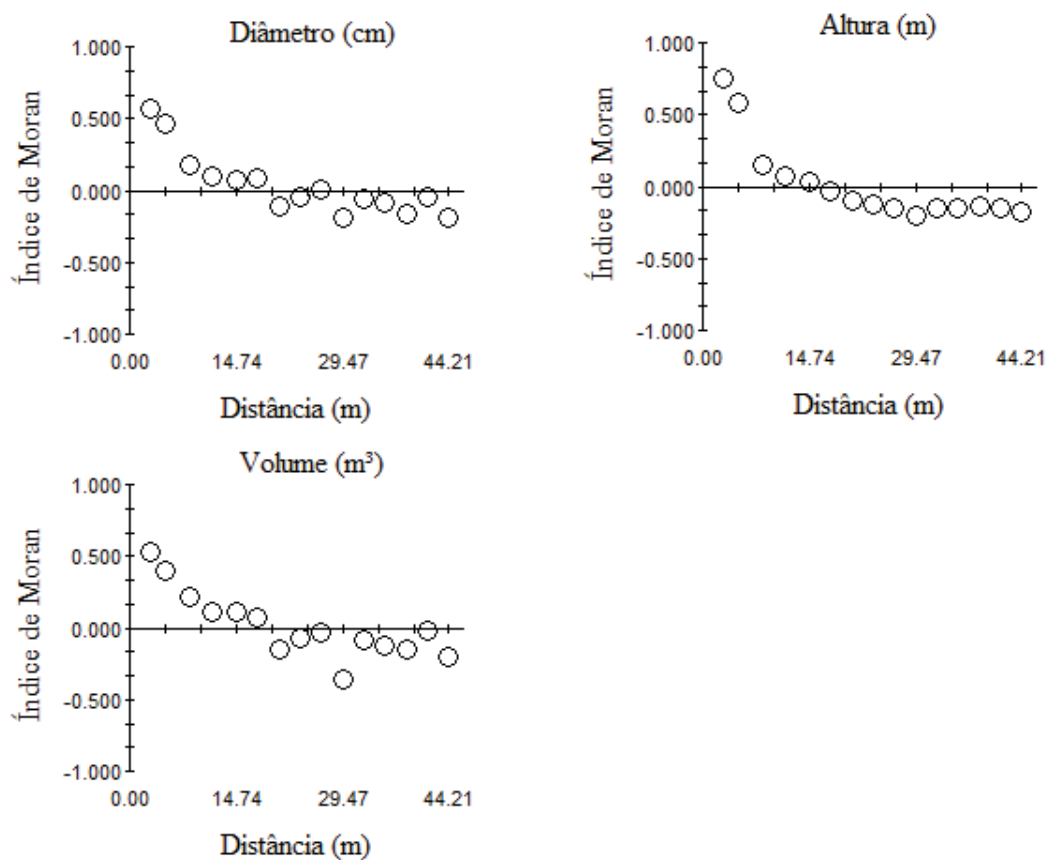
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 16 – CORRELOGRAMAS PARA AS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME PARA A IDADE DE TRÊS ANOS E MEIO, PARA CLONES DE EUCALIPTUS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



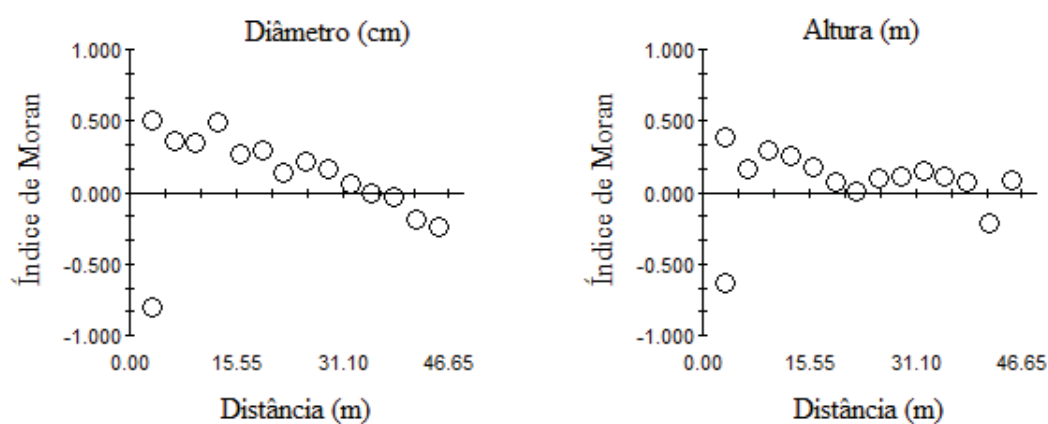
FONTE: O autor (2019).

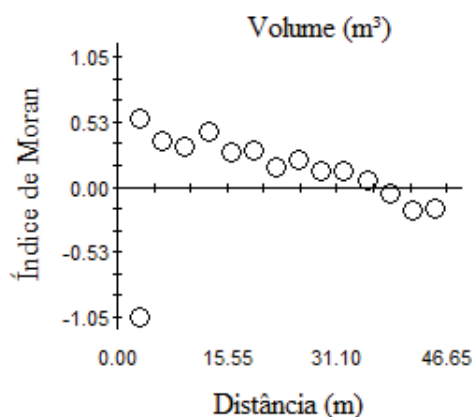
FIGURA 17 – CORRELOGRAMAS PARA AS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME PARA A IDADE DE QUATRO ANOS, PARA CLONES DE EUCALIPTUS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 18 – CORRELOGRAMAS DAS VARIÁVEIS DIÂMETRO, ALTURA E VOLUME PARA A IDADE DE CINCO ANOS, PARA CLONES DE EUCALIPTUS EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.





FONTE: O autor (2019).

3.4 ANÁLISE MULTIVARIADA DE PERFIL

Os Círculos de Nelder 1, 4 e 5 apresentam apenas dois clones. Para altura das árvores presentes no círculo de Nelder 1, a hipótese $H_0^{(1)}$ foi rejeitada (TABELA 5), indicando que os perfis médios dos clones A e F não são paralelos, e existe interação entre os dois clones nos diferentes espaçamentos. A hipótese $H_0^{(2)}$ também foi rejeitada e isso significa que os clones não são coincidentes e existe diferença significativa entre eles. O clone A apresentou maiores valores de altura, e a maior diferença entre os perfis ocorreu nos menores espaçamentos. O efeito do espaçamento foi significativo no perfil médio dos clones para a variável altura, indicado pela hipótese $H_0^{(3)}$ também rejeitada (FIGURA 19).

Para o diâmetro, a hipótese $H_0^{(1)}$ foi aceita, indicando que os perfis dos clones são paralelos e não ocorreu interação entre os clones nos diferentes espaçamentos, ou seja, apresentaram comportamento independente. A hipótese $H_0^{(2)}$ foi aceita, evidenciando que os clones são coincidentes no crescimento em diâmetro, ou seja, não se diferenciam estatisticamente. A hipótese $H_0^{(3)}$ foi rejeitada, indicando o efeito do espaçamento no comportamento dos clones.

A análise de perfil para a variável volume seguiu o mesmo comportamento do diâmetro. As hipóteses $H_0^{(1)}$ e $H_0^{(2)}$ foram aceitas e os perfis dos clones para essa variável são paralelos e coincidentes, não havendo interação entre os clones e o espaçamento, consequentemente esses clones não se diferenciaram significativamente. Já a hipótese $H_0^{(3)}$ foi rejeitada, revelando o efeito do espaçamento.

Para a variável altura, os clones presentes no círculo de Nelder 4, H e I, são coincidentes, uma vez que $H_0^{(2)}$ foi aceita, e não se diferenciaram estatisticamente. Os perfis

são paralelos, pois não ocorreu interação entre os clones nos espaçamentos. Já o fator espaçamento foi significativo (TABELA 5).

Os perfis dos clones para o diâmetro são paralelos, não ocorreu interação entre eles e o espaçamento. A hipótese $H_0^{(2)}$ foi rejeitada, indicando que os clones se diferenciam estatisticamente para a variável diâmetro. O fator espaçamento foi significativo. Para o volume $H_0^{(1)}$ $H_0^{(2)}$ e $H_0^{(3)}$ foram rejeitadas, ou seja, apresentou interação entre os clones nos espaçamentos e os clones se diferem estatisticamente. O clone H apresentou melhor desempenho que o clone I para as três variáveis, cujas diferenças são mais expressivas nos maiores espaçamentos (FIGURA 20).

Os clones H e I, presentes no círculo de Nelder 5, apresentaram diferença significativa apenas para a altura, de acordo com a hipótese $H_0^{(2)}$ rejeitada. O clone H revelou-se melhor que o clone I para essa variável. Os clones H e I mostraram interação nos diferentes espaçamentos, dada a rejeição de $H_0^{(1)}$. O efeito do espaçamento foi significativo, pois $H_0^{(3)}$ foi rejeitada (FIGURA 21).

Para o diâmetro $H_0^{(1)}$ foi aceita, portanto os clones são paralelos e não houve interação significativa entre eles e o espaçamento. A hipótese $H_0^{(2)}$ foi aceita, indicando que os clones são coincidentes. Para essa variável a hipótese $H_0^{(3)}$ foi rejeitada, indicando que o fator espaçamento foi significativo. Os clones são coincidentes para a variável volume, porém ocorreu interação significativa entre os clones e o espaçamento. O fator espaçamento foi significativo.

TABELA 5 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME, NO CÍRCULO DE NELDER 1, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

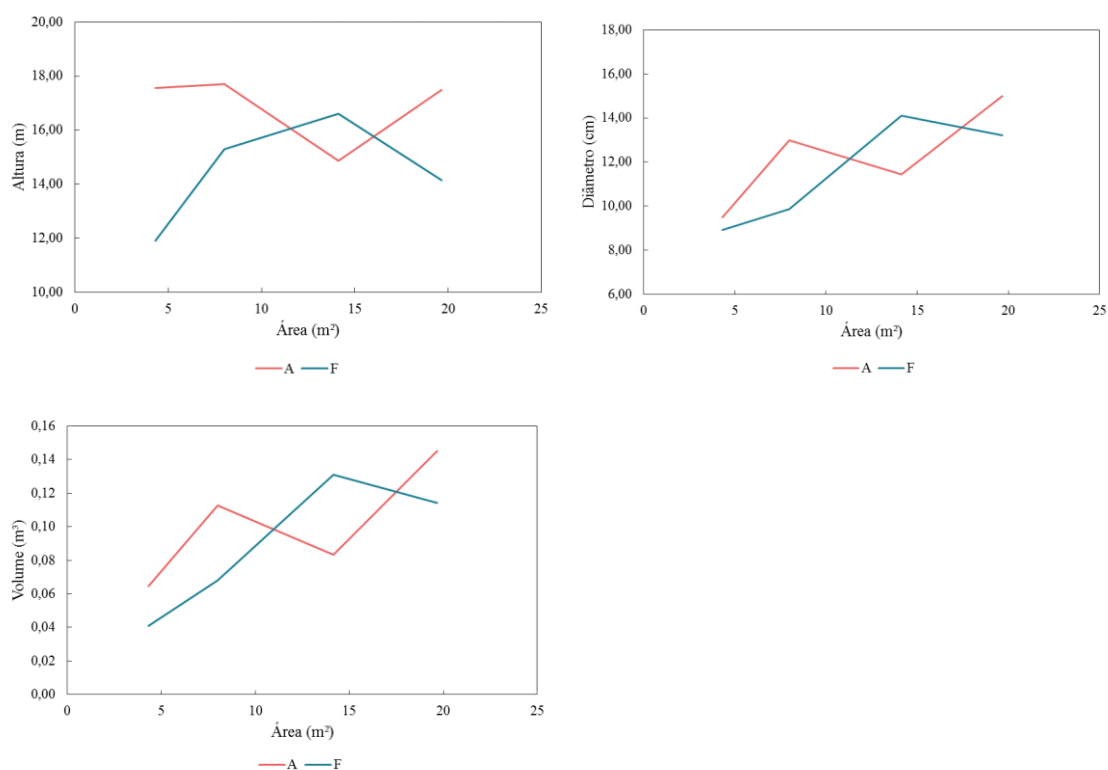
Fonte de Variação	Estatística Calculada			Estatística Tabelada
	Altura	Diâmetro	Volume	
Círculo de Nelder 1				
Clone x Espaçamento	329,1253*	11,3203 ^{ns}	9,9432 ^{ns}	22,720 (T²)
Clone	4,24*	1,14 ^{ns}	1,37 ^{ns}	2,77 (t)
Espaçamento	235,7740*	44,55*	28,6544*	22,720 (T²)
Círculo de Nelder 4				
Clone x Espaçamento	6,91 ^{ns}	13,89 ^{ns}	118,02*	22,720 (T²)
Clone	1,24 ^{ns}	3,74*	3,43*	2,77 (t)
Espaçamento	72,17*	57,11*	77,95*	22,720 (T²)
Círculo de Nelder 5				

Clone x Espaçamento	31,81*	18,73 ^{ns}	35,92*	22,720 (T ²)
Clone	-6,33*	1,18 ^{ns}	-1,78 ^{ns}	2,77 (t)
Espaçamento	32,34*	289*	509*	22,720 (T ²)

FONTES: O autor (2019).

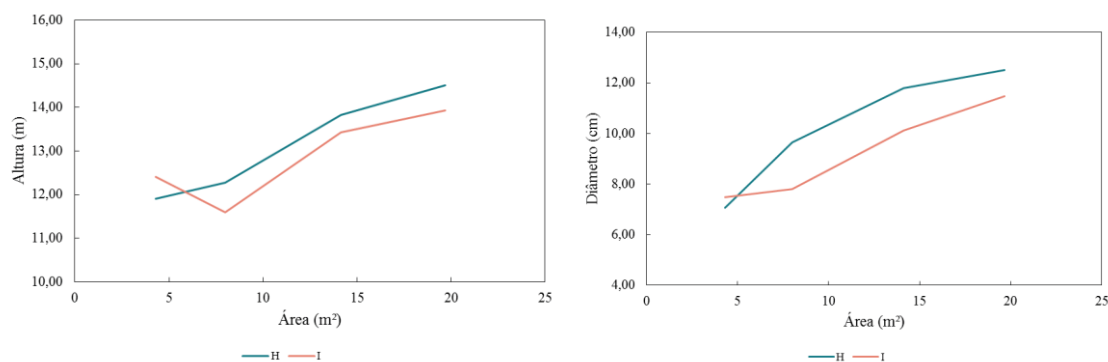
Em que: * significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade; T² é o valor tabelado do teste de Hotelling a 95% de probabilidade; t é o valor tabelado do teste t a 95% de probabilidade.

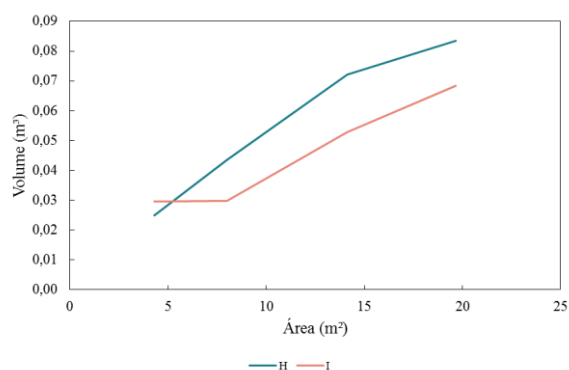
FIGURA 19 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 1, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTES: O autor (2019).

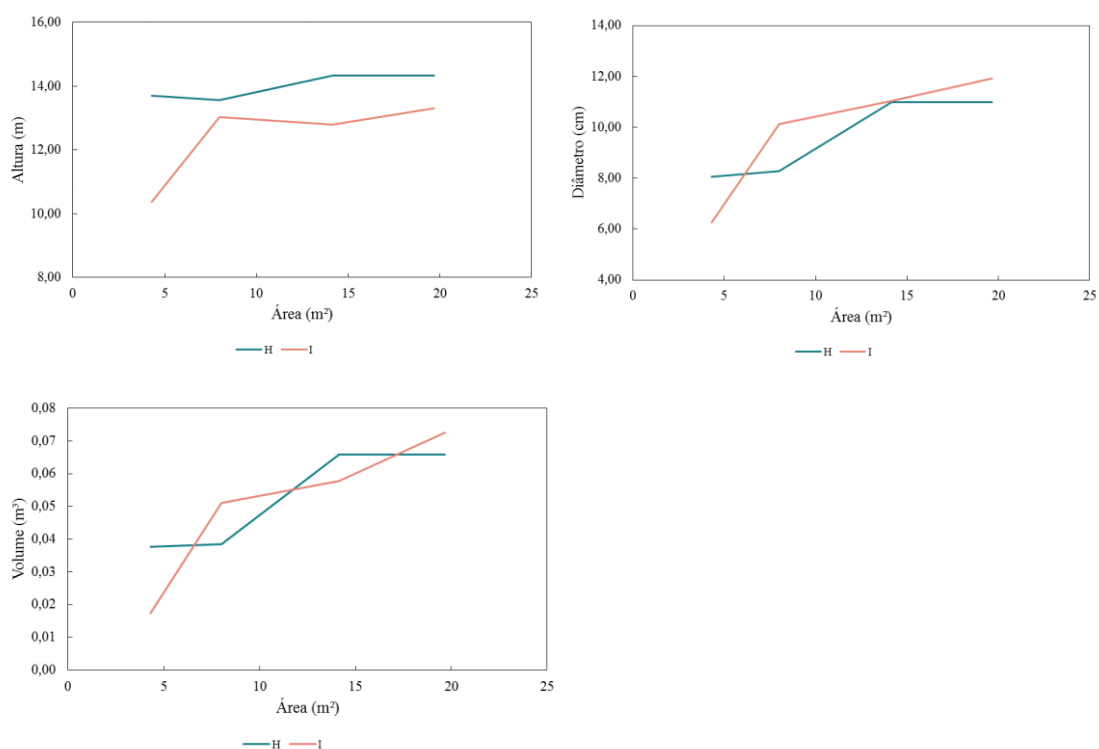
FIGURA 20 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 4, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.





FONTE: O autor (2019).

FIGURA 21 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 5, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

Já os resultados obtidos para os clones presentes no círculo de Nelder 6, 8 e 9 não apresentaram diferença entre os clones para nenhuma das três variáveis (TABELA 6). Os resultados obtidos para os clones presentes no círculo de Nelder 6, A, J, C e E, indicam que os clones são coincidentes para as variáveis altura, diâmetro e volume, de acordo com $H_0^{(2)}$, que foi aceita. Para a variável altura e volume a hipótese $H_0^{(1)}$ foi rejeitada, indicando a interação entre os clones e o espaçamento. A hipótese $H_0^{(3)}$ foi aceita apenas para a variável altura, indicando que o fator espaçamento não foi significativo. Para o diâmetro e o volume o fator espaçamento foi significativo (FIGURA 22).

Para os clones presentes no Nelder 8, G, C, B e E, os perfis médios são coincidentes para as três variáveis em estudo: altura, diâmetro e volume, uma vez que a hipótese $H_0^{(2)}$ foi aceita (TABELA 6). A hipótese $H_0^{(1)}$ foi rejeitada apenas para a variável diâmetro, indicando que para essa variável os clones apresentam interação nos diferentes tratamentos. Já o efeito do espaçamento foi significativo para a variável volume (FIGURA 23).

Para os clones presentes no círculo de Nelder 9, C, E e G, a hipótese $H_0^{(2)}$ foi aceita, indicando que os clones são coincidentes e não apresentam diferença significativa para as três variáveis (altura, diâmetro e volume). Para as variáveis diâmetro e volume os clones apresentaram interação nos diferentes espaçamentos. A hipótese $H_0^{(3)}$ foi rejeitada apenas para a variável diâmetro (FIGURA 24).

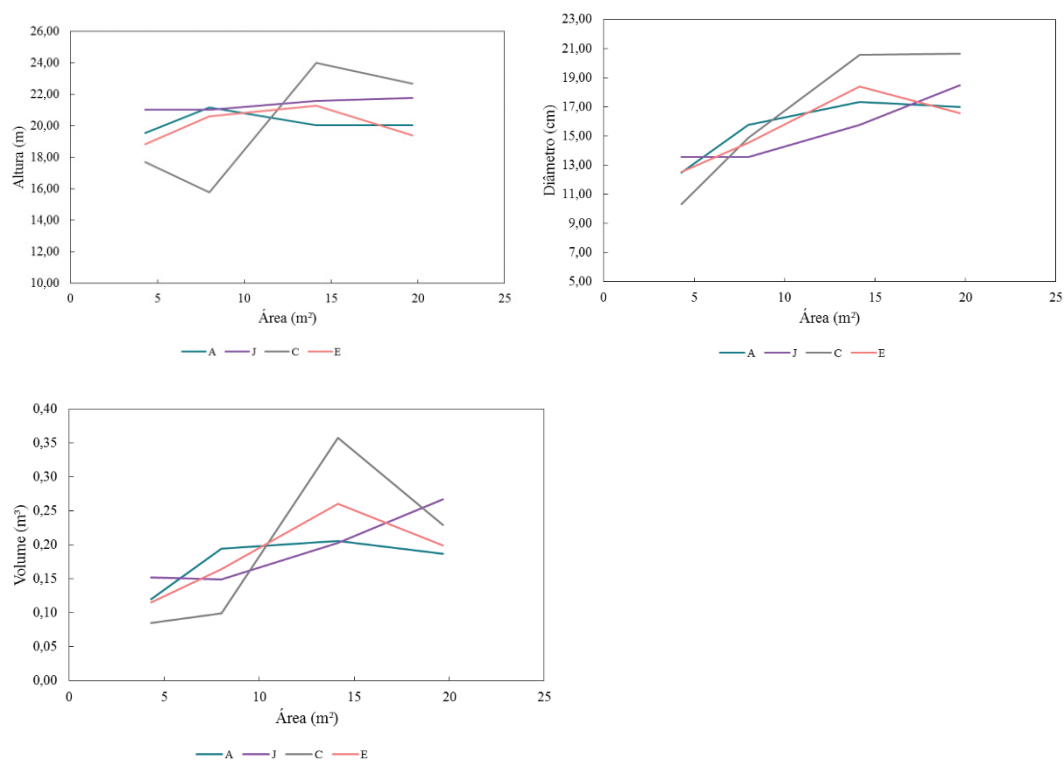
TABELA 6 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME, NO CÍRCULO DE NELDER 6, 8 e 9, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

Fator de Variação	Altura (m)		Diâmetro (cm)		Volume (m³)		Estatística Calculada (F tab)
	Wilks' Lambda	F cal	Wilks' Lambda	F cal	Wilks' Lambda	F cal	
Círculo de Nelder 6							
Clone x Espaçamento	0,1481	1,95*	0,27	1,13 ^{ns}	0,092	2,73*	1,88
Clone	0,65	1.43 ^{ns}	0,94	0,17 ^{ns}	0,94	0,14 ^{ns}	4,06
Espaçamento	0,68	1,4 ^{ns}	0,3	6,74*	0,16	10,45*	3,86
Círculo de Nelder 8							
Clone x Espaçamento	0,6237	0,35 ^{ns}	0,2533	8,84*	0,6944	0,26 ^{ns}	1,88
Clone	0,9416	0,17 ^{ns}	0,9515	0,14 ^{ns}	0,9655	0,1 ^{ns}	4,06
Espaçamento	0,458	3,55 ^{ns}	0,7314	0,22 ^{ns}	0,2964	7,12*	3,86
Círculo de Nelder 9							
Clone x Espaçamento	0,18	1,75 ^{ns}	0,113	2,63*	0,1329	2,32*	1,88
Clone	0,776	0,86 ^{ns}	0,957	0,13 ^{ns}	0,9222	0,25 ^{ns}	4,06
Espaçamento	0,46	2,31 ^{ns}	0,229	4,47*	0,47	2,24 ^{ns}	3,86

FONTE: O autor (2019).

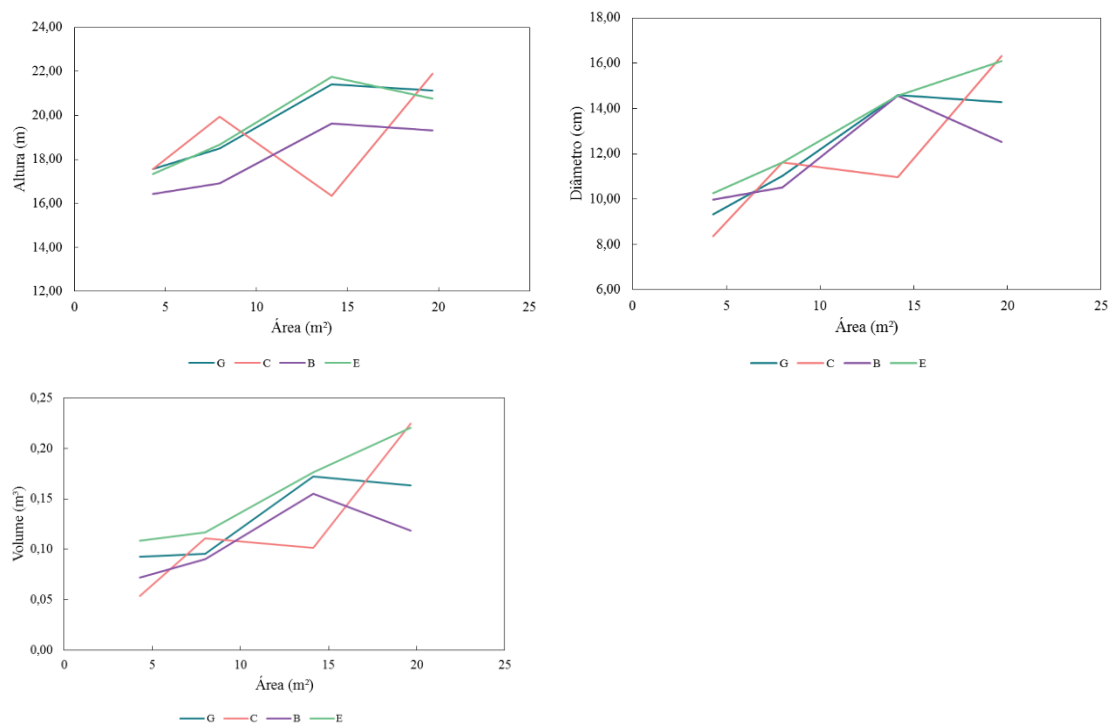
Em que: * é significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade.

FIGURA 22 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 6, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



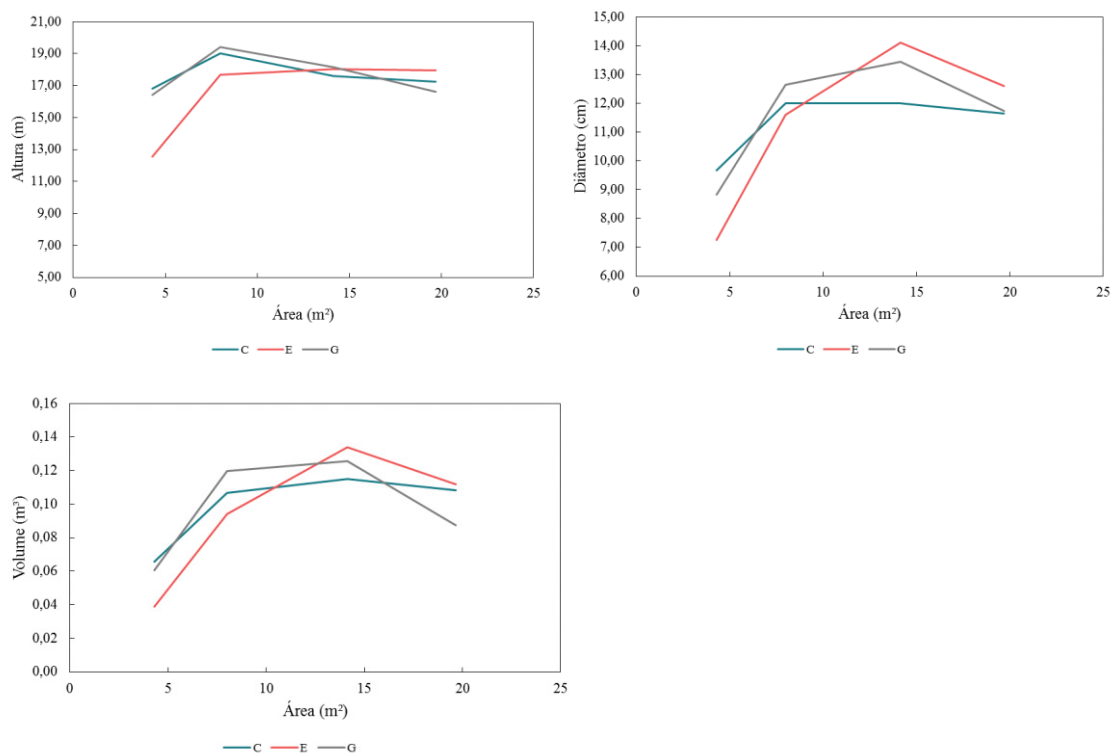
FONTE: O autor (2019).

FIGURA 23 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 8, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 24 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 9, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

Para os clones D, E e F, presentes no círculo de Nelder 2, a hipótese $H_0^{(1)}$ foi rejeitada para a variável altura (TABELA 7), indicando interação entre os clones nos diferentes espaçamentos. A hipótese $H_0^{(2)}$ foi rejeitada, indicando que os clones não são coincidentes e diferem-se estatisticamente. Já a hipótese $H_0^{(3)}$ foi aceita, indicando que o fator espaçamento não foi significativo no comportamento do perfil dos clones para a variável altura. Uma vez que o círculo de Nelder 2 apresenta três clones e a hipótese $H_0^{(2)}$ foi rejeitada, realizou-se novamente a análise multivariada comparando-os mais detalhadamente (TABELA 8). Os três clones (D, E e F) se diferenciam entre si, de acordo com a hipótese $H_0^{(2)}$, que foi rejeitada. O clone D apresentou os maiores valores em altura, seguido pelo clone E e F. Os clones D-E e D-F tiveram a hipótese $H_0^{(1)}$ rejeitada, indicando interação entre os clones nos diferentes espaçamentos. Já para os clones E e F a hipótese $H_0^{(1)}$ foi aceita, não havendo interação entre eles (FIGURA 25).

Para as variáveis diâmetro e volume, os clones são coincidentes, não se diferenciando estatisticamente, dada a aceitação da hipótese $H_0^{(2)}$. Os clones não apresentaram interação para a variável diâmetro nos diferentes espaçamentos. Já para a variável volume foi

observada interação entre os clones e o espaçamento. A hipótese $H_0^{(3)}$ foi rejeitada, indicando o efeito do espaçamento no perfil médio das variáveis diâmetro e volume.

TABELA 7 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME, NO CÍRCULO DE NELDER 2, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

Fator de Variação	Altura (m)		Diâmetro (cm)		Volume (m ³)		Estatística Calculada (F tab)
	Wilks' Lambda	F cal.	Wilks' Lambda	F cal	Wilks' Lambda	F cal	
Clone x Espaçamento	0,068	3,76*	0,41	0,73 ^{ns}	0,191	8,47*	3,58
Clone	0,129	20,08*	0,71	1,21 ^{ns}	0,725	1,14 ^{ns}	5,14
Espaçamento	0,442	2,52 ^{ns}	0,25	5,73*	0,1333	13,00*	4,75

FONTE: O autor (2019).

Em que: * é significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade.

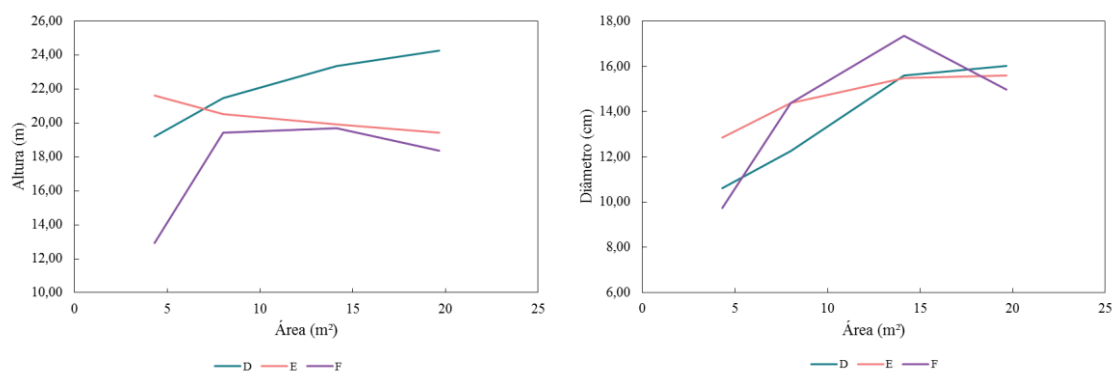
TABELA 8 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA A VARIÁVEL DENDROMÉTRICA ALTURA, NO CÍRCULO DE NELDER 2, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

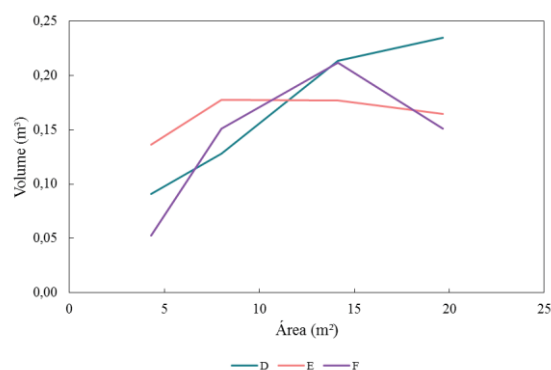
Fonte de Variação	Estatística Calculada			Estatística Tabelada
	D - E	D - F	E - F	
Clone x Espaçamento	46,46*	25,87*	19,85 ^{ns}	22,720 (T ²)
Clone	6,86*	17,09*	-28,27*	2,77 (t)
Espaçamento	6,81 ^{ns}	21,08*	38,3*	22,720 (T ²)

FONTE: O autor (2019).

Em que: * significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade; T² é o valor tabelado do teste de Hotelling a 95% de probabilidade; t é o valor tabelado do teste t a 95% de probabilidade.

FIGURA 25 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 2, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.





FONTE: O autor (2019).

Os resultados obtidos para os clones E, G, H e I, presentes no círculo de Nelder 3 (TABELA 9), demonstraram que $H_0^{(2)}$ foi rejeitada apenas para a variável altura, indicando diferença significativa entre os clones para essa variável, porém não foi constatada interação entre os clones e o espaçamento para a altura e o efeito do espaçamento nos clones não foi significativo, de acordo com as hipóteses $H_0^{(1)}$ e $H_0^{(3)}$, respectivamente.

Ao analisar os perfis médios dos clones mais detalhadamente para a altura, foi observada diferença significativa entre todos os clones, de acordo com a hipótese de coincidência $H_0^{(2)}$, a qual foi rejeitada (TABELA 10). O clone I apresentou valores superiores e o clone H apresentou os valores mais baixos (FIGURA 26).

Para as variáveis diâmetro e volume, as hipóteses $H_0^{(1)}$, $H_0^{(2)}$ e $H_0^{(3)}$ foram aceitas, indicando que os clones não se diferem estatisticamente entre si e não ocorreu interação entre eles e o espaçamento.

TABELA 9 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME, NO CÍRCULO DE NELDER 3, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

Fator de Variação	Altura (m)		Diâmetro (cm)		Volume (m³)		Estatística Calculada (F tab)
	Wilks' Lambda	F cal	Wilks' Lambda	F cal	Wilks' Lambda	F cal	
Clone x Espaçamento	0,44	0,65 ^{ns}	0,25	1,25 ^{ns}	0,276	1,14 ^{ns}	1,88
Clone	0,36	4,57*	0,77	0,75 ^{ns}	0,70	1,13 ^{ns}	4,06
Espaçamento	0,96	0,12 ^{ns}	0,465	3,44 ^{ns}	0,465	3,44 ^{ns}	3,86

FONTE: O autor (2019).

Em que: * é significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade.

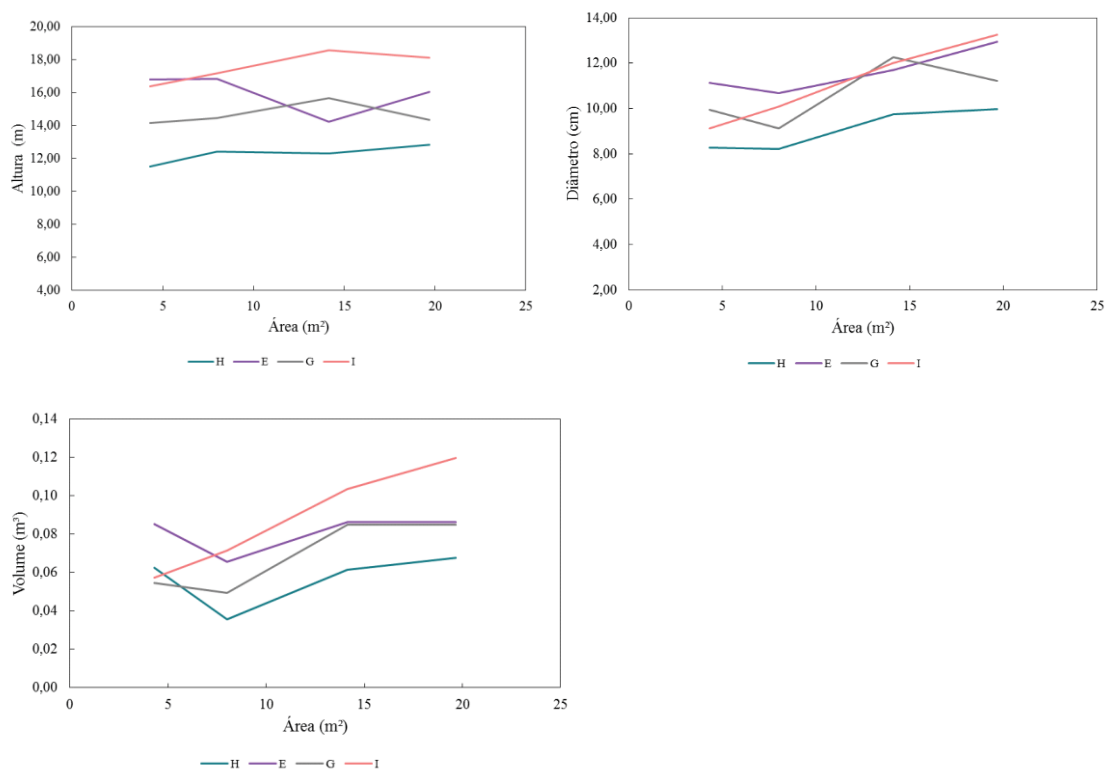
TABELA 10 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA A VARIÁVEL DENDROMÉTRICA ALTURA NO CÍRCULO DE NELDER 3, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

Fonte de Variação	Estatística Calculada						Estatística Tabelada
	H - E	H - G	H - I	E - G	E - I	G - I	
Clone x Espaço	4,73 ^{ns}	49,99*	4,11 ^{ns}	29,12*	78,16*	21,46 ^{ns}	22,720 (T ²)
Clone	-5,88*	3,85*	-7,98*	9,06*	-9,96*	-24,16*	2,77 (t)
Espaçamento	0,6364 ^{ns}	23,03*	21,21 ^{ns}	117,21*	7,73 ^{ns}	8,79 ^{ns}	22,720 (T ²)

FONTE: O autor (2019).

Em que: * significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade; T² é o valor tabelado do teste de Hotelling a 95% de probabilidade; t é o valor tabelado do teste t a 95% de probabilidade.

FIGURA 26 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 3, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

Os clones presentes no círculo de Nelder 7, A, B e C, tiveram as hipóteses $H_0^{(1)}$, $H_0^{(2)}$ e $H_0^{(3)}$ rejeitadas para as variáveis altura, diâmetro e volume, indicando que existe interação entre os clones nos diferentes espaçamentos, os clones se diferenciam estatisticamente e o fator espaçamento é significativo (TABELA 11).

Para a variável altura, o clone C e A e C e B não se diferiram e não apresentaram interação nos diferentes espaçamentos. Já os clones A e B apresentaram interação significativa e se diferem estatisticamente (TABELA 12). Para a variável diâmetro os clones C e A são coincidentes e não apresentaram interação. Já os clones C e B e A e B se diferenciam e apresentam interação significativa (TABELA 13). A variável volume apresentou o mesmo comportamento do diâmetro, portanto os clones C e A são coincidentes e não apresentaram interação. Já os clones C e B e A e B apresentam interação e se diferenciaram estatisticamente (TABELA 14).

O clone B apresentou valores inferiores para as três variáveis, com maior diferença que os outros clones nos maiores espaçamentos (FIGURA 27). O clone A apresentou melhores resultados nos menores espaçamentos.

TABELA 11 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME, NO CÍRCULO DE NELDER 7, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

Fator de Variação	Altura (m)		Diâmetro (cm)		Volume (m³)		Estatística Calculada (F tab)
	Wilks' Lambda	F cal	Wilks' Lambda	F cal	Wilks' Lambda	F cal	
Clone x Espaçamento	0,05	4,18*	0,074	3,56*	0,077	3,58*	3,58
Clone	0,305	6,81*	0,36	5,17*	0,322	6,29*	5,14
Espaçamento	0,08	14,45*	0,1	11,35*	0,095	12,7*	4,75

FONTE: O autor (2019).

Em que: * é significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade.

TABELA 12 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA A VARIÁVEL DENDROMÉTRICA ALTURA, NO CÍRCULO DE NELDER 7, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

Fonte de Variação	Estatística Calculada			Estatística Tabelada
	C – A	C - B	A - B	
Clone x Espaçamento	17,7242 ^{ns}	2,442 ^{ns}	65,9539*	22,720 (T²)
Clone	-0.5764 ^{ns}	2,4507 ^{ns}	3,066*	2,77 (t)
Espaçamento	8,63*	72,9412*	19,782*	22,720 (T²)

FONTE: O autor (2019).

Em que: * significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade; T² é o valor tabelado do teste de Hotelling a 95% de probabilidade; t é o valor tabelado do teste t a 95% de probabilidade.

TABELA 13 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA A VARIÁVEL DENDROMÉTRICA DIÂMETRO, NO CÍRCULO DE NELDER 7, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

Fonte de Variação	Estatística Calculada			Estatística Tabela
	C – A	C - B	A - B	
Clone x Espaçamento	10 ^{ns}	173,5373*	46,7798*	22,720 (T ²)
Clone	-2 ^{ns}	9,7423*	8,3899*	2,77 (t)
Espaçamento	5,6793 ^{ns}	442,145*	64,4983*	22,720 (T ²)

FONTE: O autor (2019).

Em que: * significativo a 95% de probabilidade; ns não significativo a 95% de probabilidade; T² é o valor tabelado do teste de Hotelling a 95% de probabilidade; t é o valor tabelado do teste t a 95% de probabilidade.

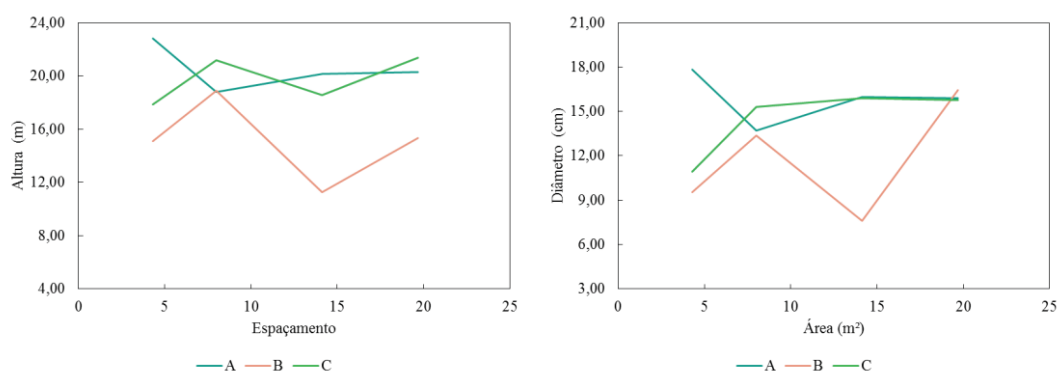
TABELA 14 – ANÁLISE MULTIVARIADA PARA O EFEITO DOS FATORES ESPAÇAMENTO, CLONE E INTERAÇÃO (ESPAÇAMENTO X CLONE) PARA A VARIÁVEL DENDROMÉTRICA VOLUME NO CÍRCULO DE NELDER 7, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.

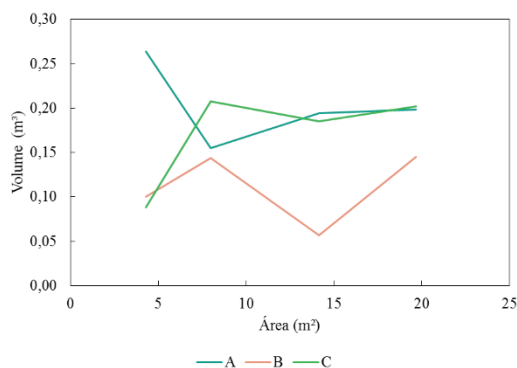
Fonte de Variação	Estatística Calculada			Estatística Tabela
	C – A	C - B	A - B	
Clone x Espaçamento	8,2795 ^{ns}	132,50*	42,43*	22,720 (T ²)
Clone	-2,345 ^{ns}	9,060*	9,39*	2,77 (t)
Espaçamento	5,2779 ^{ns}	539,82*	37,84*	22,720 (T ²)

FONTE: O autor (2019).

Em que: * significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade; T² é o valor tabelado do teste de Hotelling a 95% de probabilidade; t é o valor tabelado do teste t a 95% de probabilidade.

FIGURA 27 – PERFIS MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ALTURA, DIÂMETRO E VOLUME NAS DIFERENTES ÁREAS PARA OS CLONES DO CÍRCULO DE NELDER 7, LOCALIZADO NO ESTADO DO TOCANTINS.





FONTE: O autor (2019).

4 CONCLUSÃO

O comportamento médio das variáveis dendrométricas altura, diâmetro e volume foi crescente com o aumento da área vital por planta, enquanto que nos maiores espaçamentos, os valores dessas variáveis foram maiores, comprovando a hipótese do trabalho.

A estrutura diamétrica por classe de espaçamento demonstra que nos espaçamentos amplos o número de árvores é maior nas classes de diâmetro maiores. Na classe de espaçamento I, com espaçamentos mais adensados, há menor quantidade de árvores, devido a mortalidade.

A hipótese de autocorrelação espacial dos dados foi confirmada. A existência de dependência espacial foi verificada para as variáveis diâmetro e altura para as árvores nas diferentes idades.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, P. S. R. **Crescimento inicial de eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo “leque”**. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- BERGER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HASELEIN, C. R. Efeito do espaçamento e da adubação do crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.2, p.75 – 87, 2002.
- BOX, G. E. P., & COX, D. R. **An analysis of transformations**. **Journal of the Royal Society**, 26(2), p. 211-252, 1964.
- DANIEL, T.W., HELMS, J.A., BACKER, F.S. **Principles of silviculture**. New York: McGraw-Hill, 1979.
- FOX, J. C.; BI, H.; ADES, P. K. Spatial dependence and individual-tree growth models II. Modelling spatial dependence. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 245, p. 20–30, Jun. 2007.
- FOX, J.C.; ADES, P.K.; BI, H. Stochastic structure and individual-tree growth models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.154, p. 261–276, Nov. 2001.
- GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; J-P BOUILLET, J. P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Africa do Sul, v. 70, 105-118 Dez. 2008.
- HUMMEL, S. Height, diameter and crown dimensions of *Cordia alliodora* associated with tree density. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 127, p. 31-40, Mar. 2000.
- LIMA, M. O. L. 2017. Dinâmica da distribuição diamétrica e prognose do crescimento de eucalipto em diferentes espaçamentos para multiprodutos. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- MORAN, P. A. F. Notes on continuous stochastic phenomena. **Biometrika**, London, v. 37, n. 2, p.17-23, 1950.
- MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. DE C. O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.39, n.1, p.199-208, Jan/Fev. 2015.
- NELDER, J. A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, Washington, v.18, n.3, p. 283-307, set. 1962.
- ODA-SOUZA, M.; BARBIN, D.; RIBEIRO JR, P. J.; STAPE, J. L. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio

de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 499-509, Mai/Jun. 2008.

OLIVEIRA NETO, S. N. DE; REIS, G. G. DOS; REIS, M. DAS G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região do cerrado de Minas Gerais. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 755-762, Out/Dez. 2010.

PELISSARI, A. L. **Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L. f.** 119 f. Tese - (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PROJETO RADAMBRASIL Folha SC.22 Tocantins; geologia, geomorfologia, fitologia, vegetação e uso potencial da terra Brasil Ministério das Minas e Energia Secretaria Geral. Rio de Janeiro, 1981.

RADOSEVICH, S.R.; OSTERYOUNG, K. (Org.). Principles governing plant-environment interactions. In: WALSTAD, J.B.; KUCH, P.J. **Forest vegetation management for conifer production**. New York: John Wiley & Sons, p.105-156. 1987

RENCHER, A. C. **Methods of multivariate analysis**. 2 ed. (Wiley series in probability and mathematical statistics) 1934. Brigham Young University

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

SILVA JÚNIOR, J. L. C. da. **Avaliação parcial das condições pluviométricas no Estado do Tocantins, durante o período chuvoso 2015/2016**. Palmas: Fundação Universidade do Tocantins Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação Núcleo Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2016. Relatório Técnico.

STAPE, J. L. **Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; MICHAEL G. RYAN, M. G.; FONSECA, S. LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. de A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L. G.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1684–1694, Abr. 2010.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D. Insights from full-rotation Nelder spacing trials with Eucalyptus in São Paulo, Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Africa do Sul, v.72, p. 91-98, Set. 2010.

TEODORO, J. V. **Avaliações multivariada, geoestatística e de medidas repetidas e um experimento sob delineamento sistemático tipo “leque”**. 110 f. Tese (Doutorado em ciências) – Estatística e experimentação agrônoma. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

UHL, E.; BIBER, P.; ULBRICHT, M.; HEYM, M.; HORVÁTH, T.; LAKATOS, F.; GÁL, J.; STEINACKER, L.; TONON, G.; VENTURA, M.; PRETZSCH, H. Analyzing the effect of stand density and site conditions on structure and growth of oak species using Nelder trials along and environmental gradient: experimental design, evaluation methods, and results. **Forest Ecosystems**. v. 5, p. 2-19, Dez. 2015.

WAGHORN, J. M.; MASON, E. G.; WATT, M. S. Influência da densidade de povoamento inicial e genótipo na variação longitudinal do módulo de elasticidade de *Pinus radiata* de 17 anos. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 252, 30, p. 67-72, Nov. 2007.

CAPÍTULO II

COMPETIÇÃO DE CLONES DE EUCALIPTO EM DELINEAMENTOS SISTEMÁTICOS DE NELDER

RESUMO

A competição entre as árvores é um fator determinante na produtividade e nos processos ecológicos das florestas, sendo muito influenciada pelo espaçamento entre as plantas. A competição é tradicionalmente avaliada utilizando índices que expressam matematicamente o estado competitivo de árvores vizinhas, porém é difícil tornar comparáveis os resultados obtidos com os índices, pois geralmente não estão em escala padronizada, e não resultam em valores adimensionais. Neste estudo foi desenvolvido um índice para avaliar a competição entre árvores em diferentes espaçamentos, denominado de *IC* proposto, que foi formulado de acordo com duas premissas iniciais: (1) a competição é dependente da densidade do povoamento, ou seja, quanto mais próximas as árvores estiverem umas das outras, maior será a competição; (2) a alta densidade exerce influência nas dimensões dos diâmetros do povoamento. A hipótese que fundamentou a pesquisa é de que o novo índice de competição proposto pode explicar melhor o efeito da competição em locais com diferentes espaçamentos, uma vez que este índice se apresenta de forma adimensional, com uma escala padronizada, variando entre zero e um, o que facilita a interpretação dos resultados. Os dados utilizados no estudo são provenientes de um experimento com dez clones de eucalipto, distribuídos em nove círculos de Nelder, localizados no norte do estado do Tocantins. Além da metodologia desenvolvida para o índice de competição, foram testados dois índices independentes da distância: Stage, e Tomé e Burkhart, e dois índices dependentes da distância de Moore et al. (1973), e Rouvenien e Kuuluvainen (1997) para comparação com o *IC* proposto e para avaliar o desempenho dos índices independentes e dependentes da distância em diferentes espaçamentos. O efeito da competição na mortalidade das árvores foi avaliado utilizando os percentuais de mortalidade nos distintos espaçamentos. Foi analisada a correlação entre os índices de competição e as variáveis altura, diâmetro, volume e área transversal, distância média e percentual de mortalidade. O índice de competição proposto na pesquisa gerou resultados superiores de correlação com as variáveis em estudo, quando comparado com os índices tradicionais. A competição no delineamento de Nelder foi melhor explicada por este novo índice, pois suas características asseguram uma melhor compreensão da relação competitiva entre as árvores. A utilização dos índices de competição independentes da distância em locais com espaçamentos e áreas distintas demonstraram desempenho inferior aos índices de competição dependentes da distância. Nas menores áreas ocorreram as maiores porcentagens de mortalidade, demonstrando a importância da densidade das plantas e da competição para explicar esta variável.

Palavras-chave: Índice de Competição. Espaçamentos. Estrutura Espacial. Mortalidade de plantas.

CHAPTER II

COMPETITION OF EUCALYPTUS CLONES IN NELDER SYSTEMEAL DESIGN

ABSTRACT

The competition among trees is a determining factor in the productivity and ecological processes of the forests, being very influenced by the spacing between the plants. Competition is traditionally evaluated using indexes that mathematically express the competitive state of neighboring trees, but it is difficult to make the results obtained with the indexes comparable, since they are not usually on a standard scale and are not expressed by a dimensionless value. In this study an index was developed to evaluate the competition among trees at different spacings, called the *proposed CI*, and was formulated according to two initial assumptions: (1) competition is dependent on population density, the closer the trees are, the greater the competition; (2) the high density also exerts influence in the diameters of the stand. The hypothesis underlying the research is that the proposed new competition index can better explain the effect of competition in locations with different spacing, since this index is presented in a dimensionless way, with a standardized scale ranging from zero to one, facilitating the interpretation of results. The data used in the study come from an experiment with ten eucalyptus clones, distributed in nine Nelder circles, located in the northern state of Tocantins. In addition to the methodology developed for the competition index, two indices independent of distance were tested: Stage, and Tomé and Burkhart, and two indices dependent on the distance Moore et al. (1973), and Rouvenien and Kuuluvainen (1997) for comparison with the *proposed CI* and to evaluate the performance of independent and distance dependent indices at different spacings. The effect of competition on tree mortality was evaluated using the percentages of mortality at different spacings. The correlation between the competition indexes and the variables height, diameter, volume and cross-sectional area, mean distance and percentage of mortality were analyzed. The competition index proposed in the research generated higher correlation results with the variables under study when compared to the traditional indexes. The competition in Nelder's design was better explained by this new index, because its characteristics assures better understanding of the competitive relationship between the trees. The use of distance-independent competition indices in locations with distinct spacing and areas showed lower performance than distance-dependent competition indices. In the smaller areas, the highest mortality rates occurred, demonstrating the importance of plant density and competition to explain this variable.

Keywords: Competition Index. Spacing. Spatial Structure. Plant mortality.

1 INTRODUÇÃO

Um fator determinante na dinâmica, produtividade e processo ecológico das florestas é a competição entre árvores, e esta é resultante da interação entre indivíduos, provocada por um recurso compartilhado em oferta limitada, levando a uma redução na sobrevivência e crescimento (BEGON et al., 2006). A competição inicia quando os recursos necessários para o crescimento das árvores diminuem, afetando o desempenho produtivo das plantas (WEBER et al., 2008). Entender como as árvores vizinhas interagem em uma comunidade florestal é importante para compreender a ecologia e estabelecer ações de manejo florestal.

As localizações espaciais das plantas podem revelar informações importantes sobre mecanismos diretamente relacionados à competição, tais como a densidade (JIANG et al., 2018). Uma alta ou baixa densidade de plantas por área gera um desempenho produtivo diferenciado, em função de competição por espaço, água, luz e nutrientes que estão presentes no ambiente (ZANINE e SANTOS, 2004). A falta de espaço, resultante de uma alta densidade de indivíduos, influencia diretamente seu desenvolvimento (ASSMANN, 1970).

A competição envolve interações complexas, que dependem do arranjo espacial das árvores, dos suprimentos de recursos e da eficiência do seu uso. O resultado da competição pode ser caracterizado pelos tamanhos e distâncias das árvores em uma vizinhança ao redor de uma determinada árvore (LUU et al., 2013).

Para pesquisar o efeito do espaçamento no crescimento de plantas pode-se valer do delineamento sistemático de Nelder (1962). Esse arranjo possibilita avaliar diferentes espaçamentos e densidades de plantas, em áreas relativamente pequenas, reduzindo a necessidade de plantações experimentais com extensas áreas. Os círculos de Nelder se caracterizam por apresentarem a distribuição das plantas nas interseções de raios e arcos, nos quais naturalmente vão se formando várias densidades ao longo do comprimento dos raios.

Segundo Vanclay (2006), os círculos de Nelder informam a resposta dos índices de competição melhor do que os plantios retangulares em uma grade regular. Nos espaçamentos retangulares se obtêm apenas um intervalo e distâncias entre árvores sendo mais restrito, e o vizinho mais próximo é mais ou menos constante, em contraste com a ampla gama de espaçamentos existentes nos círculos de Nelder, nos quais o espaçamento varia sistematicamente. Poucos tem sido os trabalhos realizados testando índices de competição em círculos de Nelder, com destaque para Vanclay (2006, 2013) e Uhl et al. (2015).

O estudo da competição em padrões distintos de espaçamentos, como o delineamento sistemático de Nelder, detém o potencial para responder questões quanto ao comportamento das plantas vizinhas, resultante da densidade de árvores em povoamentos e das condições limitadas de recursos (JIANG et al., 2018). Além disso, no Brasil são poucos os trabalhos que relatam a realidade da competição de árvores em espaçamentos distintos. A competição para espécies do gênero *Eucalyptus* também é pouco estudada, com destaque ao trabalho de Martins et al. (2011).

A competição é tradicionalmente avaliada utilizando índices que expressam matematicamente o estado competitivo de uma árvore referência em relação às árvores vizinhas. Basicamente, esses índices podem ser divididos em duas classes principais: índices independentes da distância e dependentes da distância. Os índices independentes da distância são funções simples, com variáveis de dimensões de uma árvore objeto em relação às árvores competidoras, não utilizando as coordenadas dos indivíduos. Já os índices dependentes da distância incorporam-na entre uma árvore referência e seus vizinhos, e também seus tamanhos (WEISKITTEL ET AL., 2011; TOMÉ E BURKART, 2012).

Os índices de competição foram desenvolvidos visando obter resultados do estado competitivo para diferentes espécies e locais. Staebler (1951) apresentou o primeiro índice de competição, no qual assumiu que cada árvore detinha uma área circular de influência expressa em função de seu tamanho (TOMÉ E BURKART, 2012). Posteriormente, Clark e Evans (1954) desenvolveram um índice de competição utilizando a distância média entre a árvore central e os vizinhos mais próximos (WEISKITTEL et al., 2011). Após os primeiros trabalhos, uma grande variedade de índices de competição foi desenvolvida, e são atualmente muito utilizados (STAGE, 1973; GLOVER E HOOL, 1979; DANIELS et al., 1986, LORIMER, 1983; TOMÉ E BURKHART, 1989; HEGYI, 1974; MOORE et al., 1973; ROUVINEN E KUULUVAINEN, 1997).

Apesar de suas crescentes aplicações, em muitos casos é difícil torná-los comparáveis quanto aos seus resultados, uma vez que eles não expressam valores em escala padronizada e, a maioria deles, não resultam valores adimensionais. A busca por um índice de fácil interpretação, com uma escala padronizada e com valores adimensionais é interessante, especialmente para avaliar a competição em diferentes espaçamentos.

Após tais considerações, os seguintes objetivos foram estabelecidos para este estudo:

- i) Desenvolver um índice para descrever a competição das árvores em diferentes espaçamentos;
- ii) Comparar o índice desenvolvido e proposto na pesquisa com os índices tradicionais;
- iii) Avaliar o desempenho dos índices de competição dependentes e

independentes da distância em diferentes espaçamentos; *iv*) Avaliar o efeito da competição na mortalidade de árvores.

O trabalho é fundamentado na hipótese de que o novo índice de competição proposto pode explicar melhor o efeito da competição em locais com diferentes espaçamentos, onde as árvores exibem padrões espaciais irregulares, uma vez que o índice de competição proposto se apresenta de forma adimensional, com uma escala padronizada, para facilitar a interpretação dos resultados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

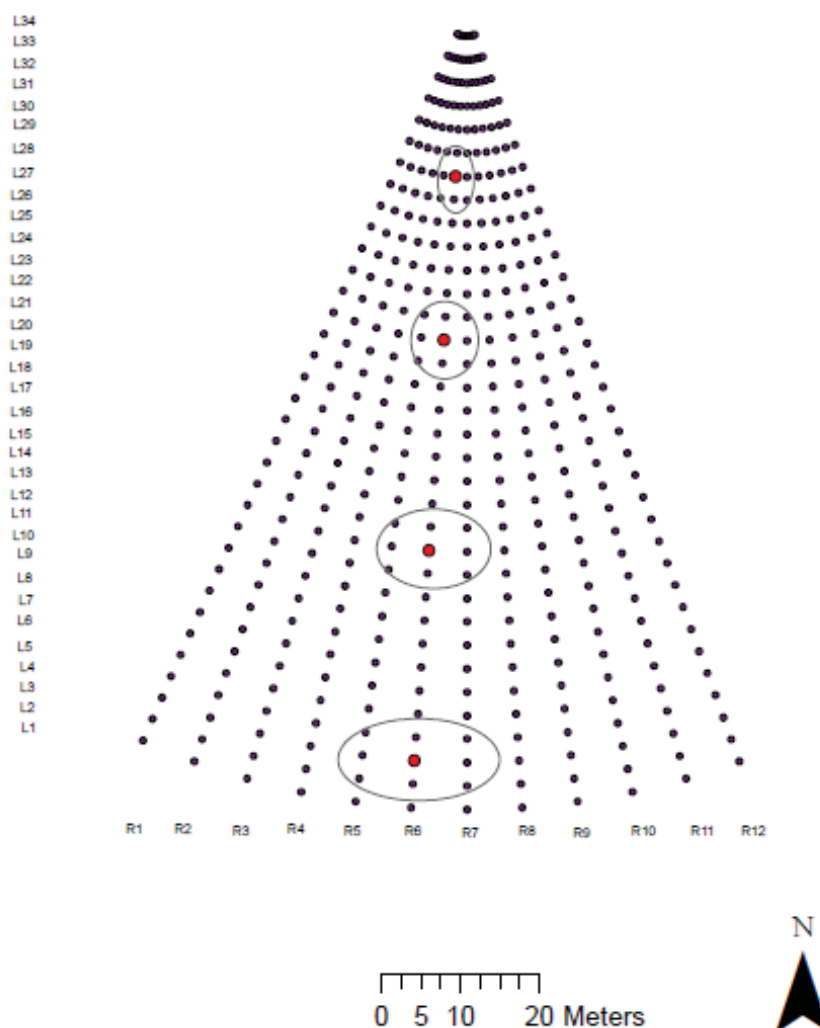
Os dados utilizados no estudo são provenientes de um experimento com dez clones de *Eucalyptus* spp., no qual foram instalados nove círculos de Nelder adaptados no período de 2010 a 2014, no estado do Tocantins. As informações referentes à área de localização e as características do experimento estão descritas no Capítulo I, no item 2.1 e 2.2.

2.2 ESTUDO DA COMPETIÇÃO

2.2.1 Método de amostragem e seleção das árvores competidoras

Quatro unidades amostrais por clone foram selecionadas, dispostas de forma sistemática ao longo dos raios, de maneira que representassem os diferentes espaçamentos. Uma adaptação do método de amostragem de Prodan foi utilizada, considerando uma árvore como ponto central da unidade amostral - UA, denominada de árvore referência, e as oito árvores mais próximas dela foram amostradas na UA, denominadas de árvores vizinhas, pois elas estão inseridas em áreas individuais distintas e podem estar ativamente em competição (FIGURA 1). Como os círculos de Nelder se compõem de 2 a 4 clones, o número de UAs variou de 8 a 16 por círculo, totalizando 104 UAs.

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DAS UNIDADES AMOSTRAIS DISTRIBUÍDAS AO LONGO DOS RAIOS DE UM CLONE, PRESENTE NO CÍRCULO DE NELDER.



Em que: L são as linhas; R são os raios dos círculos de Nelder.

FONTE: O autor (2019).

2.2.2 Coleta dos dados

Os dados foram coletados no ano de 2016, quando os círculos de Nelder tinham de 2 a 5 anos de idade. As variáveis dendrométricas mensuradas foram diâmetro à altura do peito (d), considerado a 1,30 m de altura do solo e altura total (h).

A porcentagem de mortalidade das árvores foi avaliada por clone, ao longo dos raios. Foi verificada a mortalidade nas quatro classes de espaçamento definidas na TABELA 1. Para quantificar o percentual de mortalidade em cada classe foi considerado o número de árvores que existia no início do experimento e avaliada a proporção das árvores consideradas mortas e as falhas.

TABELA 1 – CLASSES DE ESPAÇAMENTO DEFINIDAS DE ACORDO COM A ÁREA VITAL POR PLANTA, NO DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, PARA CLONES DE EUCALIPTO, NO ESTADO DO TOCANTINS.

Classe	Descrição	Área vital
I	Muito adensado	Menor que 5,9 m ²
II	Adensamento moderado	6 m ² a 10,9 m ²
III	Pouco adensado	11 m ² a 15,9 m ²
IV	Não adensado	Maior que 16 m ²

FONTE: O autor (2019).

2.2.3 Desenvolvimento do Índice de competição

A competição entre árvores em um povoamento é o resultado de sua maior ou menor proximidade entre elas. Esse processo é resultante da maior ou menor disponibilidade de nutrientes, de luz e de água no povoamento onde elas se encontram.

No presente trabalho é proposto um novo índice para se avaliar a competição entre árvores em um povoamento florestal. Para sua formulação, considere que a competição é dependente da densidade do povoamento, ou seja, quanto mais próximas estiverem as árvores umas das outras, maior será a competição. Considere, ainda, que a alta densidade também exerce forte influência sobre os diâmetros no povoamento, em que, quanto mais próximas elas estiverem umas das outras, os seus diâmetros tenderão a se aproximarem em seus valores. Com o aumento da área disponível para cada árvore, o processo de competição diminui e, conseqüentemente, os diâmetros se tornarão mais variáveis em suas dimensões diamétricas.

Considerando-se essas premissas iniciais, o Índice de Competição – *IC* proposto incorpora esses dois efeitos de maneira simultânea. Assim, resulta do produto de duas razões: a primeira expressa a proporção da área geométrica média das distâncias tomadas de cada árvore da amostra a partir de uma árvore referência em relação à mesma média tomada na parcela de maior competição (parcela em condição mais adensada); a segunda razão considera a área transversal média dos diâmetros de todas as árvores ocorrentes na *UA*, em relação à mesma média tomada na parcela de maior competição no povoamento amostrado (Equações 1 e 2).

$$IC = \frac{\left(\prod_{i=1}^{n-1} D_{i1}^2 \right)^{\frac{1}{n-1}}}{\left(\prod_{i=1}^{n-1} D_i^2 \right)^{\frac{1}{n-1}}} \frac{\bar{g}_{i1}}{\bar{g}_i} = \frac{\left(\prod_{i=1}^{n-1} D_{i1}^2 \right)^{\frac{1}{n-1}}}{\left(\prod_{i=1}^{n-1} D_i^2 \right)^{\frac{1}{n-1}}} \frac{\sum_{n=1}^n \frac{\pi}{4} \frac{d_{i1}^1}{n}}{\sum_{n=1}^n \frac{\pi}{4} \frac{d_i^1}{n}} \quad (1)$$

$$IC = \frac{\left(\prod_{i=1}^{n-1} D_{i1}^2 \right)^{\frac{1}{n-1}} \frac{\sum_{i=1}^n d_{i1}^2}{n}}{\left(\prod_{i=1}^{n-1} D_i^2 \right)^{\frac{1}{n-1}} \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} = \frac{\left(\prod_{i=1}^{n-1} D_{i1}^2 \right)^{\frac{1}{n-1}} \sum_{i=1}^n d_{i1}^2}{\left(\prod_{i=1}^{n-1} D_i^2 \right)^{\frac{1}{n-1}} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (2)$$

Em que: IC é o índice de competição; D_{i1} são as distâncias entre as árvores em relação à árvore referência tomada da unidade amostral com maior competição no círculo de Nelder; g_{i1} são as áreas transversais das árvores tomadas da unidade amostral de maior competição; d_{i1} são os diâmetros das árvores tomadas na unidade amostral com maior competição no círculo de Nelder; D_i são as distâncias tomadas em relação à árvore referência em todas as demais unidades amostrais no círculo de Nelder; g_i são as áreas transversais de todas as árvores tomadas nas amostras; d_i são os diâmetros de todas as árvores das unidades amostrais tomadas no círculo de Nelder; n é o número de árvores da unidade amostral considerada.

A competição máxima será observada quando ambas as proporções forem iguais a um, ou seja, quando a média geométrica das distâncias quadráticas de todas as árvores incluídas na UA com maior competição no círculo de Nelder for tomada em relação a esse mesmo valor na UA e também quando a média quadrática das áreas transversais de todas as árvores tomadas na unidade amostral com maior competição no círculo de Nelder for tomada em relação a esse mesmo valor, aqui denominada de parcela referência. Nessa situação o índice resulta em valor igual a um. Em todas as outras circunstâncias o índice será menor do que um. Ambas as proporções, nessas condições, são menores do que um e, quanto menor ele for, menor competição ocorrerá.

Valores do índice próximos de zero ocorrem quando as distâncias das árvores em relação às árvores referências forem muito grandes, portanto, nesse caso, a primeira proporção se aproxima de zero. Complementarmente, quanto maiores forem os diâmetros das árvores nas demais UAs , a segunda proporção resultará em um valor que tende para zero.

Observe que diâmetros sob extrema competição tendem a ser mais próximos de um mesmo valor do que diâmetros de árvores crescendo livres de competição.

2.2.4 Análise dos dados

Para efeito de comparação com o IC proposto foram calculados quatro índices de competição tradicionais amplamente utilizados, os índices independentes da distância de Stage (1973) (3) e Tomé e Burkart (1989) (4), e os índices dependentes da distância de Moore et al. (1973) (5) e Rouvinen e Kuuluvainen (1997) (6).

$$I(1) = \frac{d_i}{q} \quad (3)$$

$$I(2) = \frac{d_i}{d_{\max}} \quad (4)$$

$$I(3) = \sum_{j=1}^n \frac{d_i^2}{d_i^2 + d_j^2} D_{ij} \quad (5)$$

$$I(4) = \sum_{j=1}^n \frac{\frac{d_j}{d_i}}{D_{ij}^2} = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i} \frac{1}{D_{ij}^2} \quad (6)$$

Em que: I (1) é o índice de competição de Stage; I (2) é o índice de competição de Tomé e Burkart; I (3) é o índice de competição de Moore et al.; I (4) é o índice de competição de Rouvinen e Kuuluvainen; d_i e d_j são os diâmetros a 1,30 m do solo (dap) da árvore referência i e da árvore competidora j (cm); q é diâmetro médio quadrático da unidade amostral; d_{\max} é o diâmetro a 1,30 do solo (dap) máximo da unidade amostral; D_{ij} é a distância entre a árvore referência e a árvore competidora (cm).

A interpretação do índice de Stage sugere que quanto maior o valor do índice, menor é a competição. O índice de Tomé e Burkart (1989) considera que a competição pode ser expressa por meio da influência exercida pela árvore de diâmetro máximo da UA e, dessa forma, quanto maior o índice, menor é a competição.

O índice de competição dependente da distância de Moore et al. (1973), baseia-se no método de Brown (1965) de área potencialmente disponível, expressa a competição descrevendo uma zona de influência primária para uma árvore individual, conforme limitado pela concorrência exercida por árvores circundantes. Assim, quanto maior o índice, menor é a competição. O índice de Rouvinen e Kuuluvainen (1997) sugere uma modificação do índice de Hegyi e emprega maior peso para a distância, assim, quanto menor o índice, menor é a competição.

2.2.5 Análise de correlação

A avaliação do desempenho dos índices de competição foi realizada por meio da análise de correlação. Para tanto, os dados foram agrupados por classe de idade para verificar a correlação nas diferentes idades. A normalidade dos dados das variáveis envolvidas foi avaliada utilizando o teste de Kolmogorov- Smirnov a 95% de probabilidade. As variáveis que não atenderam a hipótese de normalidade foram transformadas, utilizando a função de

Box-Cox. Após esse procedimento, algumas variáveis ainda não atenderam a condição de normalidade e, por esse motivo, foi aplicada a correlação de Spearman.

Correlações entre os índices de competição com as variáveis dendrométricas altura total, diâmetro a 1,30 m de altura do solo, área transversal e volume, e com a distância média entre as árvores e porcentagem de mortalidade foram estabelecidas. A significância dessas variáveis foram avaliadas por meio do teste *t*, a 95% de probabilidade.

A interpretação dos coeficientes de correlação de Spearman sugere que valores positivos ou negativos entre 0 e 0,19 apresenta uma correlação bem fraca, entre 0,20 a 0,39 uma correlação fraca, entre 0,4 a 0,69 a correlação é moderada, entre 0,7 a 0,89 a correlação é considerada forte e acima de 0,9 a correlação é muito forte (SIEGEL, 1975).

2.2.6 Análise gráfica

Para avaliar o desempenho do índice de competição proposto no trabalho (*IC proposto*) e os demais índices testados, foram gerados gráficos de dispersão com os valores dos índices para os crescentes tamanhos das áreas vitais. O comportamento médio dos índices de competição nas diferentes densidades foi analisado para todas as idades.

A análise da mortalidade foi efetuada utilizando-se gráficos de suas respectivas percentagens para os diferentes clones e idades, dentro de cada classe de espaçamento. Para identificar a qual círculo de Nelder os clones pertenciam, foi utilizada uma codificação alfanumérica, formado pela letra correspondente ao clone e, entre parênteses, a numeração do círculo de Nelder.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

O índice de competição (*IC*), proposto na pesquisa, resultou em maiores valores de coeficiente de correlação em relação aos demais índices testados para as variáveis: diâmetro, área transversal, volume, distância média e percentual de mortalidade em todas as idades (TABELA 2). A correlação foi negativa, indicando que, quanto menor a distância entre plantas e menores valores de diâmetro, altura, área basal e volume, maior é a competição. O que corrobora com a teoria utilizada para o desenvolvimento do índice.

A correlação entre a variável diâmetro e o *IC proposto* variou de forte (-0,79) a muito forte (-0,98) para todas as idades, sendo todas significantes. A área transversal apresentou

correlação significativa com o *IC proposto* em todas as idades, variando de moderada (-0,59) a muito forte (-0,95). A variável volume apresentou correlação moderada (-0,42) a forte (-0,87), e para a idade de cinco anos não foi significativa. A correlação do IC com a distância média entre as árvores variou de forte (-0,89) a muito forte (-0,97), sendo todas significantes.

A correlação entre o *IC proposto* e a variável altura foi maior em comparação com os demais índices na idade de três anos e três anos e meio, com correlação moderada. Já para a idade de dois e cinco anos o coeficiente de correlação foi levemente inferior ao obtido para o índice de Rouvinen e Kuuluvainen (1997). A correlação da altura com os índices de competição não foi significativa nas idades de quatro e cinco anos. Aos três anos foi observada a única correlação significativa com o *IC proposto*.

O índice independente da distância de Stage resultou em correlação não significativa com as variáveis em estudo, em todas as idades. O índice independente da distância de Tomé e Burkhart (1989) resultou significância apenas na idade de três anos para as variáveis diâmetro e volume, e aos três anos e meio para as variáveis: altura, volume e distância. A correlação para esses índices variou de bem fraca a moderada.

A correlação entre o índice dependente da distância de Moore et al. (1973) e as variáveis em estudo, variou de bem fraca a moderada com a altura (0,14 a 0,66) e fraca a forte com as demais variáveis dendrométricas. Apenas na idade de quatro anos os valores do coeficiente de correlação não foram significantes para as variáveis altura, diâmetro, área transversal e volume e as variáveis distância e mortalidade. O índice de competição de Rouvinen e Kuuluvainen (1997) resultou em valores superiores aos obtidos para os índices tradicionais testados, porém, valores inferiores ao *IC proposto*, com correlação moderada a forte para as variáveis: diâmetro (-0,51 a -0,92), área transversal (-0,45 a -0,84), volume (-0,31 a -0,83) e distância (-0,73 a -0,90) e correlação forte a fraca com a variável altura, sendo significativa para essas variáveis em todas as idades.

O *IC proposto* apresentou valores superiores aos dois índices de competição dependentes da distância, resultando em média, um valor de 18,62% maior na correlação com a altura, 32,32% para o diâmetro, 37,9 % para a área transversal e 40,4% para o volume.

TABELA 2 - CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E OS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO DEPENDENTES E INDEPENDENTES DA DISTÂNCIA PARA CLONES DE EUCALIPTO EM CÍRCULOS DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.

Índice de Competição	<i>h</i> (m)	<i>d</i> (cm)	<i>g</i> (m ²)	<i>v</i> (m ³)	<i>D</i> (m)	<i>M</i> (%)
2 Anos						
Stage	-0,44 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,35 ^{ns}	-0,38 ^{ns}	0,22 ^{ns}
Tomé e Burkhart (1989)	-0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Moore et al. (1973)	0,66*	0,77*	0,78*	0,81*	0,81*	0,03 ^{ns}
Rouvinen e Kuuluvainen (1997)	-0,72*	-0,82*	-0,84*	-0,83*	-0,86*	0,10 ^{ns}
IC proposto	-0,66*	-0,94*	-0,95*	-0,87*	-0,89*	0,26 ^{ns}
3 Anos						
Stage	0,07 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,12 ^{ns}	-0,25 ^{ns}
Tomé e Burkhart (1989)	0,30 ^{ns}	0,40*	0,35 ^{ns}	0,37*	0,28 ^{ns}	-0,39 ^{ns}
Moore et al. (1973)	0,24 ^{ns}	0,59*	0,55*	0,47*	0,64*	-0,52*
Rouvinen e Kuuluvainen (1997)	-0,26 ^{ns}	-0,69*	-0,66*	-0,55*	-0,75*	0,57*
IC proposto	-0,36*	-0,80*	-0,82*	-0,69*	-0,93*	0,74*
3,5 Anos						
Stage	0,17 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,22 ^{ns}	-0,29 ^{ns}
Tomé e Burkhart (1989)	0,42*	0,33 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,37*	0,47*	-0,47*
Moore et al. (1973)	0,53*	0,61*	0,62*	0,63*	0,83*	-0,52*
Rouvinen e Kuuluvainen (1997)	-0,67*	-0,70*	-0,72*	-0,73*	-0,88*	0,57*
IC proposto	-0,68*	-0,81*	-0,80*	-0,79*	-0,96*	0,68*
4 Anos						
Stage	-0,24 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,23 ^{ns}
Tomé e Burkhart (1989)	-0,13 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,20 ^{ns}	-0,26 ^{ns}
Moore et al. (1973)	0,14 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,57 ^{ns}	-0,35 ^{ns}
Rouvinen e Kuuluvainen (1997)	-0,18 ^{ns}	-0,51*	-0,45*	-0,33 ^{ns}	-0,73*	0,40 ^{ns}
IC proposto	-0,34 ^{ns}	-0,79*	-0,77*	-0,59*	-0,95*	0,58*
5 Anos						
Stage	0,13 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,32 ^{ns}	-0,37 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,02 ^{ns}
Tomé e Burkhart (1989)	0,34 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,29 ^{ns}	-0,35 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,21 ^{ns}
Moore et al. (1973)	0,21 ^{ns}	0,80*	0,51 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,79*	-0,78*
Rouvinen e Kuuluvainen (1997)	-0,21 ^{ns}	-0,92*	-0,48 ^{ns}	-0,31 ^{ns}	-0,90*	0,89*
IC proposto	-0,05 ^{ns}	-0,98*	-0,59*	-0,42 ^{ns}	-0,97*	0,94*

FONTES: O autor (2019).

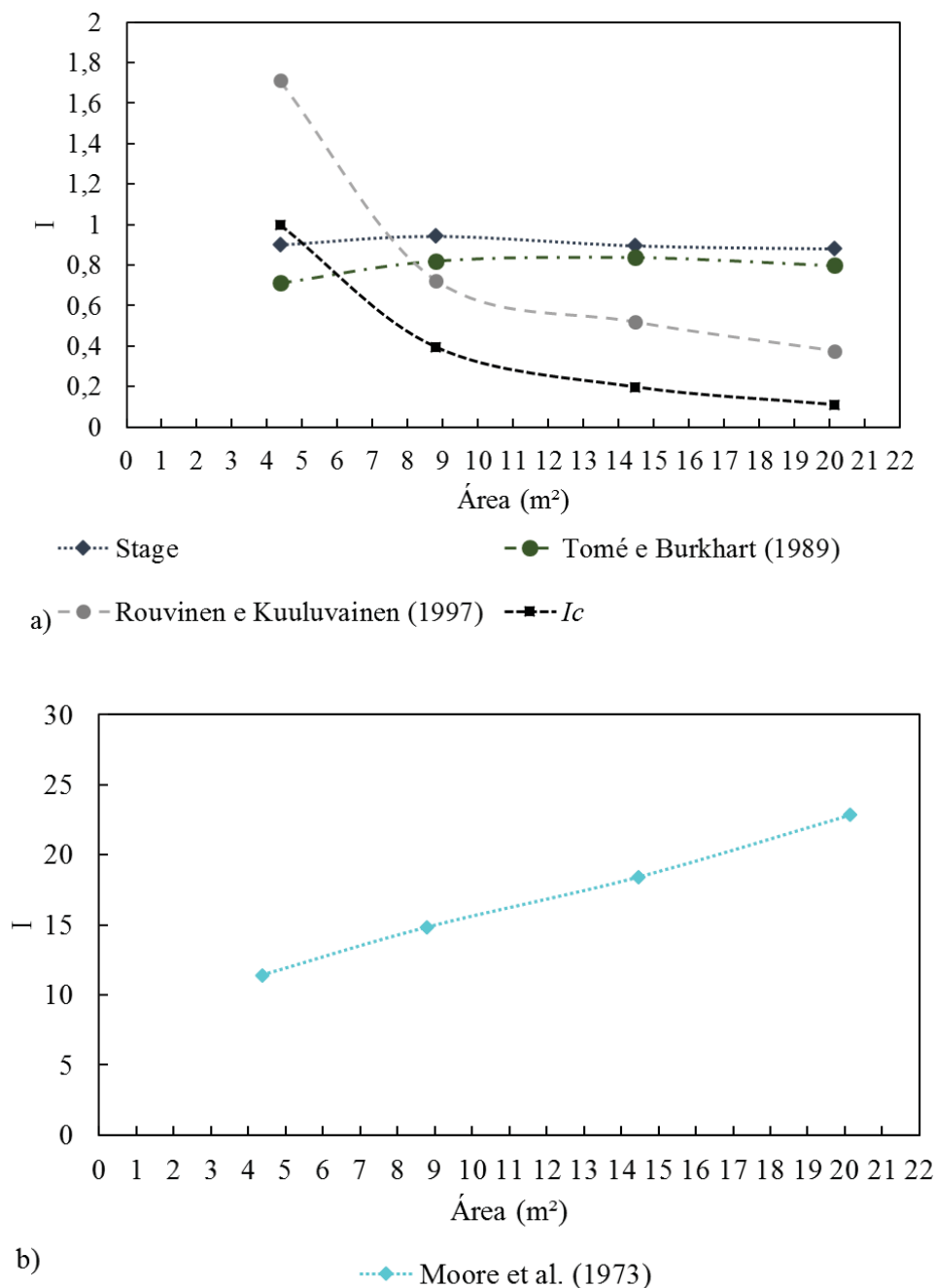
Em que: * é significativo a 95% de probabilidade; *ns* é não significativo a 95% de probabilidade. *h* é a altura total; *d* é o diâmetro a 1,3 metros do solo; *g* é a área transversal; *v* é o volume total; *D* é a distância entre as árvores; *M* (%) é a porcentagem de mortalidade.

Entre os índices avaliados (FIGURA 2), o único com domínio de ocorrência em uma escala padronizada, variando entre 0 e 1, é o *IC proposto*, facilitando sua interpretação e o estabelecimento de padrões de competição. O comportamento médio desse índice resultou em valores decrescentes com o aumento da área por planta, com valores próximos de zero nas maiores áreas.

Os índices dependentes da distância de Moore et al. (1973) e Rouvinen e Kuuluvainen (1997) também demonstraram que nas maiores áreas a competição é menor. O índice de Moore et al. (1973) resultou em valores médios em uma escala maior que a dos outros índices testados, dificultando a interpretação gráfica dos resultados em relação aos demais índices (FIGURA 2b). O índice de competição de Rouvinen e Kuuluvainen (1997) demonstrou o mesmo comportamento que o *IC proposto*, ou seja, quanto menor é a competição, menor é o valor do índice, com isso, as curvas do comportamento médio desses dois índices foram semelhantes.

Os índices independentes da distância de Stage, e Tomé e Burkhart (1989) apresentaram comportamentos médio semelhantes, com pouca variação dos valores nas diferentes áreas (FIGURA 2a). O maior valor médio para o índice de competição de Stage foi observado na classe de espaçamento II, e para Tomé e Burkhart na classe de espaçamento III, sugerindo que as áreas presentes nessas classes de espaçamento apresentam menor competição. Esse comportamento uniforme e retilíneo, a falta de significância e a baixa correlação dos índices com as variáveis dendrométricas, distância média entre as plantas e mortalidade, indicam que os índices independentes da distância não expressam adequadamente a competição em locais onde as árvores possuem espaçamentos distintos, como no delineamento sistemático de Nelder.

FIGURA 2 - a) COMPORTAMENTO MÉDIO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO DE STAGE, TOMÉ E BURKART (1989), ROUVINEN E KUULUVAINEN (1997) E O IC PROPOSTO NAS DIFERENTES ÁREAS, EM CÍRCULOS DE NELDER, IMPLANTADOS COM CLONES DE EUCALIPTO NO ESTADO DO TOCANTINS, BR. b) COMPORTAMENTO MÉDIO DO ÍNDICE DE MORRE et al. (1973) NAS DIFERENTES ÁREAS.



FONTE: O autor (2019).

Contrariando os presentes resultados, outros estudos relatam bons desempenhos para índices independentes da distância. Martins et al. (2011), avaliando cinco índices de competição, independentes da distância, para plantios comerciais clonais não desbastados de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com espaçamento de 3x3 m, no município

de Monte Dourado, PA, concluíram que o índice de competição de Stage (1973) foi o melhor para descrever a competição entre árvores. Curto (2016), estudando o status competitivo de árvores de araucária em um povoamento superestocado, com espaçamento inicial de 2x2 m, encontrou bom desempenho para os índices de Stage (1973), e Tomé e Burkhart (1989), tendo relatado, ainda, uma leve superioridade para esses índices, quando comparado aos índices dependentes da distância. Rivas et al. (2005) observaram que os índices de competição independentes da distância resultaram em desempenho tão bom quanto os índices de competição dependentes da distância em povoamentos adultos de mesma idade de *Pinus cooperi* Blanco. Bérubé-Deschênes et al. (2017), ao quantificarem a competição em povoamentos de *Picea glauca* Moench, concluíram que os índices independentes da distância resultaram em melhor desempenho.

Esses estudos foram desenvolvidos em plantações em linha, com um único espaçamento, quando existia pouca variação no arranjo espacial das árvores e, portanto, os efeitos da distância foram implicitamente eliminados (MUGASHA, 1989). Já a estrutura dos círculos de Nelder, formada por diversos espaçamentos, afetou os resultados dos índices, apresentando padrões claros de competição nos espaçamentos distintos.

Outros autores concordam que índices de competição dependentes da distância, em geral, são superiores aos índices independentes da distância. Daniels et al. (1986) relataram que os melhores índices dependentes da distância produziram modelos de crescimento da área basal levemente melhores em relação aos índices independentes da distância para plantações de *Pinus taeda* L. no norte da Louisiana. Contreras et al. (2011) concluíram que os índices dependentes da distância apresentaram melhor desempenho do que os índices independentes da distância nas florestas ocidentais de Montana. Aakala et al. (2013) também encontraram esse comportamento em estudos de competição para florestas antigas e complexas no norte de Minesota, EUA. Tenzin et al. (2017) observaram resultados de maior correlação entre os índices dependentes da distância e o crescimento, em florestas do Butão.

No presente trabalho, os desempenhos dos índices de competição dependentes e independentes da distância foram distintos entre si nos diversos espaçamentos. Os índices dependentes da distância apresentaram comportamento superior, enquanto os índices independentes da distância apresentaram comportamento semelhante nas diferentes áreas. Além disso, os índices tradicionais dependentes da distância e o *IC proposto* demonstraram que nos espaçamentos mais adensados existe maior competição, e essa reduz com o aumento da área vital por planta. O espaçamento entre as árvores influenciou claramente o

comportamento da competição, porém apenas os índices que contém a distância em sua formulação matemática conseguiram expressar o status competitivo nas diferentes áreas.

Corroborando com essas afirmações, Looney et al. (2018) mencionam que nos povoamentos florestais as maiores densidades influenciam tanto a produtividade das árvores quanto a desigualdade de tamanho, intensificando localmente a competição. Aakala et al. (2013) afirmam que a competição por recursos que afetam o crescimento das plantas é geralmente influenciada pelo processo de distribuição espacial das árvores. Vettenranta (1999) considera o conhecimento da distribuição espacial das árvores fundamental no estudo da competição e sugere que não há qualquer razão natural para a concorrência diminuir a certa distância, mas é mais realista supor que a competição diminui à medida que a distância da árvore referência aumenta.

3.2 NOVO ÍNDICE DE COMPETIÇÃO – *IC proposto*

O novo índice de competição proposto (*IC*) foi calculado e analisado com foco na estrutura espacial de distribuição das árvores e a relação do crescimento entre as árvores que estão em espaçamentos distintos. Um benefício deste *IC* é que ele considera a distribuição espacial das árvores vizinhas presentes em uma determinada amostra em relação a outra amostra e, assim, representa o atributo de local mais detalhado da competição do que o fazem os índices tradicionais.

A alta correlação desse índice com as variáveis de crescimento nas diferentes idades o possibilita expressar melhor desempenho na avaliação da competição, em comparação com os índices tradicionais. Além disso, os limites de escala estabelecidos para os valores do índice, entre 0 e 1, o torna de mais fácil interpretação, sendo essa outra característica relevante a se lhe atribuir, comparativamente aos demais índices. Uma interpretação adequada das relações entre as árvores vizinhas é essencial para quantificar a concorrência em uma única expressão matemática (TOMÉ e BURKHART, 1989).

A flexibilidade de um índice de competição pode ser restringida por vários fatores, incluindo os tipos de florestas, as condições do local e a estrutura matemática do índice (WEIGLET e JOLLIFFE, 2003). Em concordância com esse fator, o *IC* proposto apresenta uma formulação matemática relativamente simples, uma vez que é composto apenas pelas variáveis diâmetro e distância e é expresso por duas razões. A primeira corresponde a razão da área geométrica média das distâncias tomadas de cada árvore da amostra a partir de uma árvore referência em relação à média tomada nas parcelas subsequentes; a segunda é razão

da área transversal média tomada a 1,30 m de todas as árvores ocorrentes na UA, em relação às respectivas médias tomadas nas parcelas subsequentes, mostrando-se um índice flexível e prático a ser aplicado ao delineamento sistemático de Nelder, dado sua pluralidade de espaçamentos.

Índices de competição dependentes da distância, que são de simples aplicação e interpretação, podem ser utilizados mais facilmente pelos gestores florestais. Segundo Diaci (2006), esses geralmente permitem a seleção de árvores para o desbaste com base na distância, número e tamanho das árvores vizinhas. Como o índice de competição proposto permite se ter uma visão da evolução crescente para as densidades do centro para a periferia do Nelder, poderá ser um indicador para a condição de densidade do povoamento na qual este se torna ausente de competição. Nessas condições, o número de árvores por hectare indicará aproximadamente a densidade a remanescer no povoamento após a aplicação do desbaste, podendo ser utilizado na tomada de decisão do manejo florestal.

Outras pesquisas têm dado importância à índices de competição que expressem seus valores entre 0 e 1. Hui et al. (2018) desenvolveram um índice de competição para florestas nativas envelhecidas na China, nomeando-o de *SCI* - Índice de Competição Baseado em Estrutura, cujo valor é calculado valendo-se das características da estrutura espacial entre a árvore referência e suas quatro vizinhas mais próximas.

O *SCI* considera para o cálculo as variáveis de diferentes espécies: mistura (M_i), para descrever a heterogeneidade espacial das espécies, dominância (U_i) para referenciar a diferença de tamanho, agregação (W_i) para descrever o grau de distribuição regular de vizinhança e aglomeração (C_i) para descrever o grau de copas adjacentes entre a árvore referência e suas vizinhas, atribuindo-lhes pesos para a obtenção final do índice. Os resultados demonstraram que o *SCI* foi positivamente correlacionado com o índice tradicional de *Hegyi*. A variável C_i requer o conhecimento de copas que se tocam, tornando sua inclusão complicada para a obtenção final do valor do índice.

Os índices de competição formulados com variáveis de fácil obtenção apresentam vantagens, pois podem ser utilizados dados disponíveis de inventários florestais coletados com técnicas de amostragem, em que os custos de obtenção dessas variáveis são relativamente baixos. Já os índices que utilizam variáveis de complexa obtenção, como as copa das árvores, apresentam desvantagens, uma vez que as coletas são onerosas (CONTRERAS et al., 2011).

3.3 COMPETIÇÃO POR CLONE E MORTALIDADE

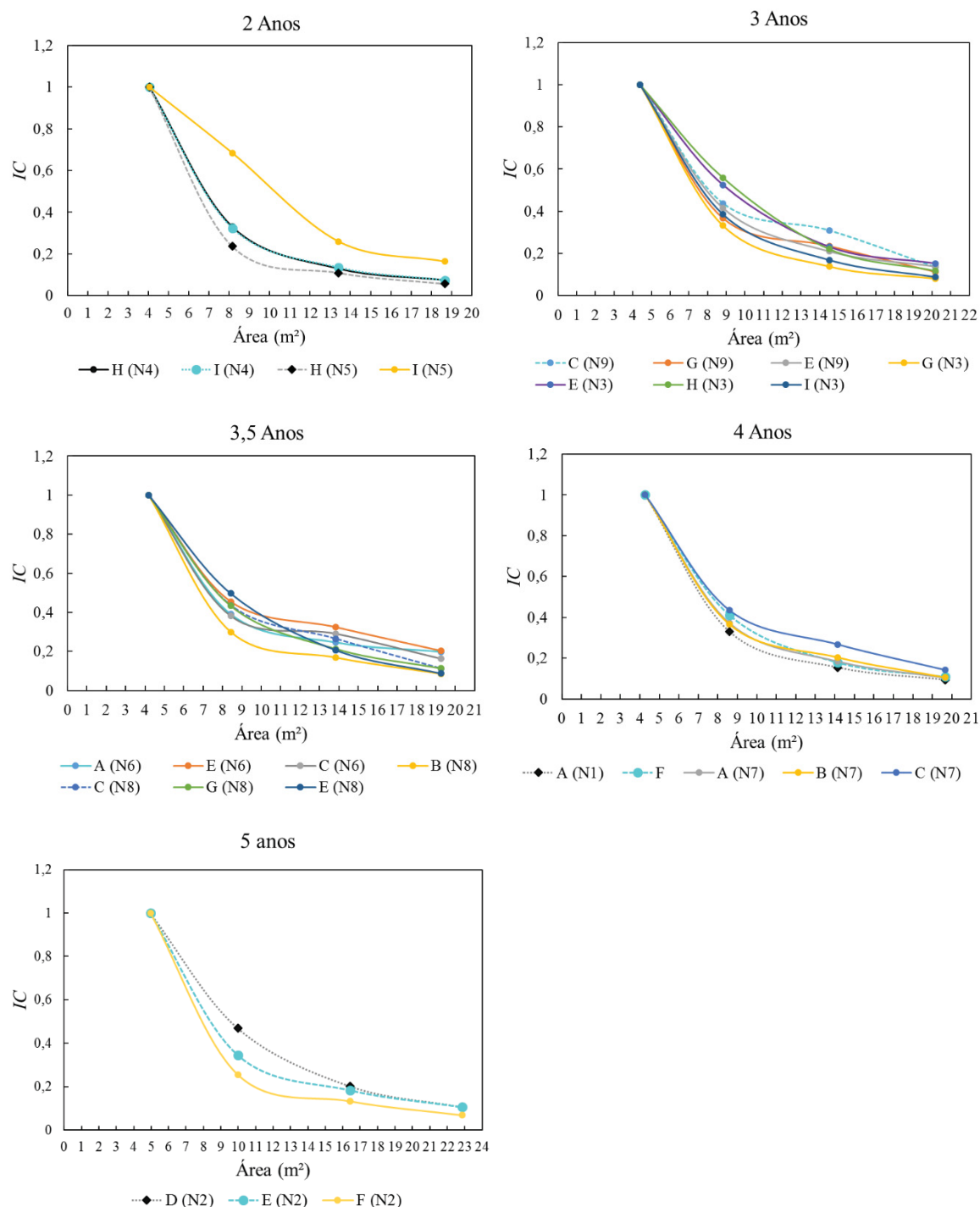
Os resultados do *IC proposto* foram satisfatórios e a avaliação da competição para os clones foi efetuada utilizando este índice. Para todos os clones em estudo, os valores resultantes do *IC proposto* seguiram o mesmo comportamento decrescente com o aumento da área média por planta, evidenciando que nas menores áreas a competição é maior (FIGURA 3).

Apesar de apresentarem o mesmo comportamento, os clones demonstraram características levemente distintas. Os clones com dois anos de idade presentes no círculo de Nelder 4, I (N4) e H (N4) apresentaram valores muito próximos, com as curvas sobrepostas. O clone I (N5) apresentou valores do índice ligeiramente superiores aos demais. Já na idade de três anos os clones apresentaram valores do *IC* distintos nas áreas das classes de espaçamento II e III e valores muito próximos nas maiores áreas.

O clone E (N6) na idade de três anos e meio atingiu os maiores valores de *IC* em comparação com os demais clones nas classes de espaçamento III e IV, e esse clone apresentou as maiores porcentagens de mortalidade nessas classes para essa idade. A influência da mortalidade no valor do *IC* para os clones foi verificada também na idade de quatro anos, em que o clone C atingiu valores superiores que os demais para o índice e apresentou também maior porcentagem de mortalidade do que nos demais clones nas classes de espaçamento II, III e IV. O clone F na idade de cinco anos apresentou os mais baixos valores de *IC* nessa idade, sendo que esse apresenta baixo percentual de mortalidade na classe II e não apresentou mortalidade nas classes III e IV com maiores áreas.

As diferentes áreas vitais por planta em estudo foi o fator que mais contribuiu para expressar a competição dos diferentes clones, porém a mortalidade também contribuiu para a explicação dos valores do *IC*. Além desses fatores, outras características específicas locais e climáticas, disponibilidade de água e nutrientes, bem como o tipo do solo podem ter influenciado o resultado final da competição. Jiang et al. (2018) constataram que, além da densidade, o estresse severo decorrente da falta de água provocada pela seca contribuiu para aumentar a competição entre as árvores. A complexidade desses fatores pode contribuir e influenciar nos diferentes valores de *IC* para os clones presentes nos círculos de Nelder no estado do Tocantins.

FIGURA 3 – COMPORTAMENTO DO ÍNDICE DE COMPETIÇÃO NOS DIFERENTES ESPAÇAMENTOS PARA OS CLONES DE EUCALIPTO, NOS CÍRCULOS DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.



FONTE: O autor (2019).

As áreas com maiores densidades de plantas contribuíram significativamente para a competição, conseqüentemente os locais com maior competição apresentaram os maiores percentuais de mortalidade (FIGURA 4). Além disso, foi observada correlação positiva moderada a muito forte entre o *IC proposto* e a porcentagem de mortalidade, evidenciando

que essa foi fortemente influenciada pela densidade e competição. Esta afirmação está de acordo com outros estudos dessas relações, os quais afirmam que a força dos efeitos competitivos está relacionada à densidade de plantas e a mortalidade é dependente desses fatores (DAS et al., 2011; HU et al., 2017).

Hu et al. (2017) concluíram que a mortalidade é evidentemente dependente da densidade em floresta subtropical de montanha da China. Das et al. (2011) afirmam que a densidade geral da floresta está relacionada aos efeitos competitivos, pois, ao estudarem a contribuição da competição na mortalidade das árvores em florestas antigas de coníferas, observaram que em duas das três parcelas com mortalidade, esta era resultante da competição em condições de alta densidade.

Os clones com dois anos apresentaram baixos percentuais de mortalidade em comparação com as demais idades. A maior taxa foi de 14,28% na classe I para o clone I (N4). Nessa idade a correlação entre a mortalidade e o *IC proposto* foi muito fraca e não significativa, porém, mesmo com a baixa mortalidade e sem correlação significativa foi observada competição nos clones dessa idade. A partir da idade de três anos, foi observado aumento considerável no percentual de mortalidade, juntamente com os valores de correlação significativa com o *IC proposto*. Esses resultados demonstram que a competição muda com o estágio de desenvolvimento do povoamento e os efeitos das interações entre as plantas vizinhas observadas em povoamentos com idades mais avançadas, nem sempre ocorreram nos povoamentos mais jovens (HOLZWARTH et al., 2015).

O percentual de mortalidade para os clones com três anos e três anos e meio foi expressivamente alto na classe I de maior densidade, com valores superiores a 50% (clones E (N3) e J (N6)), seguido de valores acima de 40% para os demais clones. O percentual de mortalidade diminuiu com o aumento da área média por planta, com exceção dos clones E (N6) e E(N8), que tiveram os valores da porcentagem de mortalidade na classe IV (área maior que 16 m²) superiores aos obtidos nas classes II e III (área vital de 6 m² a 15,9 m²).

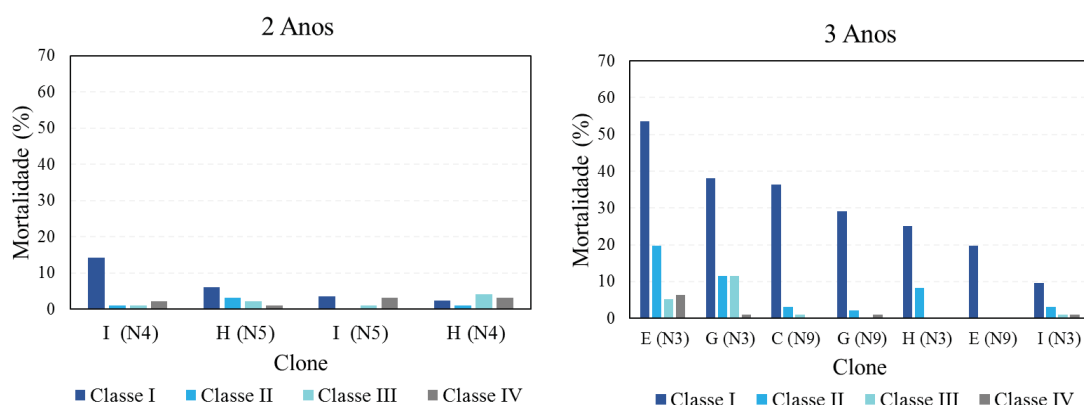
Os maiores percentuais de mortalidade foram observados para os clones com quatro anos, cujo maior valor foi de 64,28% para o clone A (N7), seguido do clone C (N7) com 57,14%, A (N1) com 52,38% e B (N7) com 41,66%, na classe I. Os clones presentes no círculo de Nelder 7 (A, B e C) apresentaram alto valor de mortalidade também nas classes II, III e IV, com destaque ao clone B, que apresentou valor de 39,58% na classe IV de menor densidade, sendo essa a maior porcentagem de mortalidade para a respectiva classe, em comparação com os outros clones. Na idade cinco anos, com um único círculo de Nelder (2), a maior taxa de mortalidade foi de 45,83% para o clone D, seguido do clone F com 23,61% e clone E com

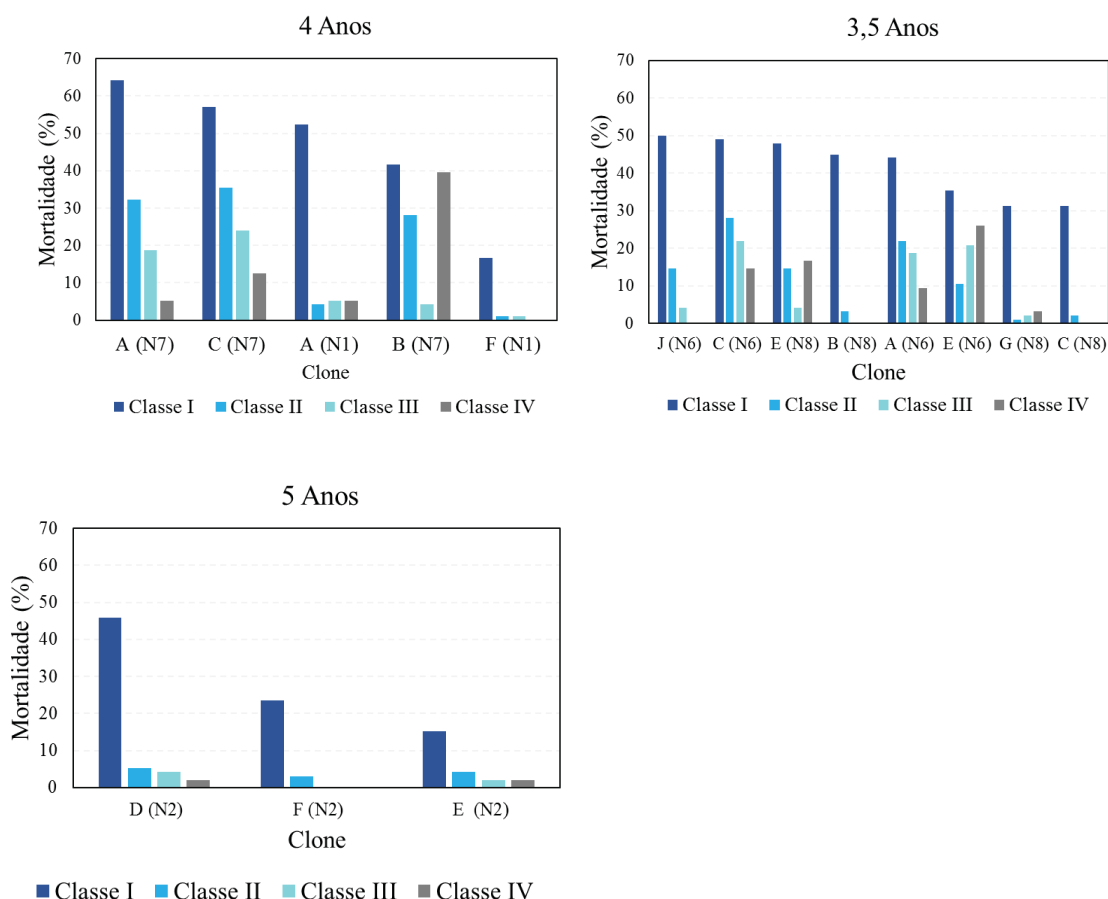
15,27%, na classe I. Nas demais classes, os clones apresentaram valores de mortalidade relativamente baixos.

As diferenças nas porcentagens de mortalidade nas classes II, III e IV para os diferentes clones sugerem que fatores além da competição estão desempenhando um papel substancial nesses resultados. As características específicas relacionadas ao material genético como adaptabilidade ao local, resistência a agentes climáticos e características fitossanitárias também contribuem para a mortalidade.

De acordo com Das et al. (2011), mesmo observando que a competição foi o fator que mais influenciou a mortalidade, mais de 50% dessa em todas as parcelas proveio de um fator biótico. A constatação foi de que elementos espaciais não competitivos para a mortalidade, como a proximidade de vetores de doenças, podem desempenhar um papel importante na determinação do risco individual de mortalidade de árvores (DAS et al., 2008). Além disso, períodos de secas extensas provocam a mortalidade das árvores, sendo um indicativo de um recente aumento no estresse por umidade, combinado com capacidade limitada dos povoamentos para se adaptarem ao aumento do estresse hídrico (JANE et al. 2016).

FIGURA 4 –PORCENTAGEM DE MORTALIDADE NAS IDADES DOIS, TRÊS, TRÊS ANOS E MEIO QUATRO E CINCO ANOS, NAS DIFERENTES CLASSES DE ESPAÇAMENTO PARA OS CLONES DE EUCALIPTO, EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, ESTADO DO TOCANTINS.





FONTE: O autor (2019).

4 CONCLUSÃO

A metodologia proposta no trabalho é apropriada para avaliar a competição das árvores em espaçamentos distintos.

A competição em delineamento de Nelder, por meio do índice de competição proposto, foi melhor descrita quando comparada com os índices de competição tradicionais.

As características do novo índice indicam ganhos práticos e interpretativos para entender a relação competitiva entre as árvores e pode ser inserido na tomada de decisão no manejo florestal.

A utilização dos índices de competição independentes da distância em locais com espaçamentos distintos não é indicada, uma vez que demonstraram desempenho inferior aos índices de competição dependentes da distância. Ainda, eles resultam em baixas correlações e valores muito próximos, não indicando padrões de competição nos diferentes espaçamentos.

Nas menores áreas ocorre as maiores porcentagens de mortalidade, indicando a importância da densidade de plantas e da competição para essa variável.

REFERÊNCIAS

- AAKALA, T; FRAVER, S; D'AMATO, A. W; PALIK, B. J. Influence of competition and age on tree growth in structurally complex old-growth forests in northern Minnesota, USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 308, p. 128-135, Nov. 2013.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970.
- BEGON, M; TOWNSEND, C. R; HARPER, J. L. **Ecology: From individuals to Ecosystems** (4 ed.), Blackwell Science, Malden, EUA, 2006.
- BÉRUBÉ-DESCHÊNES, A; FRANCESCHINI, T; R. SCHNEIDER, R. Quantifying competition in white spruce (*Picea glauca*) plantations. **Forest Science**, v. 74, p. 26, Jun. 2017.
- CLARK, P.J; EVANS, F.C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. **Ecology**, v. 35, p. 445–453, 1954.
- CONTRERAS, M. A; AFFLECK, D; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, pp. 1939-1949, Dez. 2011.
- CURTO, R. de. A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal Forest Research**, Vancouver, v. 16, p. 1230-1237, 1986.
- DAS, A; BATTLES, J; STEPHENSON, N. L; VAN MANTGEM, P. J. The contribution of competition to tree mortality in old-growth coniferous forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 261 p. 1203-1213, Abr. 2011.
- DIACI, J. **Nature-based forestry in Central Europe: Alternatives to industrial forestry and stringent preservation**. Faculdade Biotécnica, Universidade de Ljubljana. 2006. 126 p.
- GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, Bethesda, v. 25, p. 275–282, 1979.
- HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J. **Growth models for tree and stand simulation**. Stockholm Sweden: Royal College of Forestry, p. 74-90. 1974.
- HOLZWARTH, F; RÜGER, N; WIRTH, C. Taking a closer look: disentangling effects of functional diversity on ecosystem functions with a trait-based model across hierarchy and time. **Royal Society Open Science**, v. 2: 140541, p. 1- 19, Mar. 2015.

- HU, D; HU, F; ZENG, F; WANG, K; PENG, W; ZHANG, H; ZENG, Z; ZHANG, F; SONG, T. Spatial distribution of tree species in evergreen-deciduous broadleaf karst forests in southwest China. **Scientific Reports** v. 7, Nov. 2017
- HUI, G; WANG, Y; ZHANG, G; ZHAO, Z; BAI, C; LIU, W. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 422, p. 49-58, Ago. 2018.
- JANE, K; GUNST, V; WEISBERG, P. J; YANG, J; FANG, Y. Do denser forests have greater risk of tree mortality: A remote sensing analysis of density-dependent forest mortality. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 359, p. 19-32, Jan. 2016.
- JIANG, X; HUANG, J. G; CHENG, J; DAWSON, A; STADT, K. J; COMEAU, P. G; CHEN, H. Y. H. Interspecific variation in growth responses to tree size, competition and climate of western Canadian boreal mixed forests. **Science of the Total Environment**, v. 631-632, p. 1070-1078, Ago. 2018.
- LOONEY, C. E; D'AMATO, A. W; PALIK, B. J; FRAVER, S. KASTENDICK, D. N. Size-growth relationship, tree spatial patterns, and tree-tree competition influence tree growth and stand complexity in a 160-year red pine chronosequence. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 424, p. 85-94, Set. 2018.
- LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 6, p. 343-360, 1983.
- LUU, T. C; BINKLEY, D; STAPE, J. L. Neighborhood uniformity increases growth of individual Eucalyptus trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 289, p. 90-97, Fev. 2013.
- MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 9, p. 1089-1098, 2011.
- MOORE, J. A.; BUDELSKY, C. A.; SCHLESINGER, R. C. A New index representing mortality. **Forest Science**, Bethesda, v. 25, n. 2, p. 275-282, 1979.
- MUGASHA, A. G. Evaluation of simple competition indices for the prediction of volume increment of young jack pine and trembling aspen trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 26, p. 227-235, 1989.
- NELDER, J. A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, Washington, v. 18, n. 3, p. 283-307, 1962.
- RIVAS, J. J. C.; GONZALEZ, J. G. A.; AGUIRRE, O. L.; HERNANDEZ, F. J. The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of *Pinus cooperi* Blanco in Durango (Mexico). **European Journal of Forest Research**, v. 124, p. 133-142, Jun. 2005.

ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. **Canadian Journal Forest Research**, v. 27, p. 890-902, 1997.

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

STAEBLER, G. R. **Growth and spacing in an even-aged stand of Douglas-fir**. Thesis, University of Michigan, 1951. 46 f.

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA Forest Service: Research Paper INT-137. Jun. 1973.

TENZIN, J.; TENZIN, K.; HASENAUER, H. Individual tree basal area increment models for broadleaved forests in Bhutan. **Forestry**, Oxford, v. 90, p. 367-380, Mai. 2017.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, Oxford v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.

TOME, M; BURKHART, A. E. **Modeling Forest Trees and Stands**. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2012.

UHL, E.; BIBER, P.; ULBRICHT, M.; HEYM, M.; HORVÁTH, T.; LAKATOS, F.; GÁL, J.; STEINACKER, L.; TONON, G.; VENTURA, M.; PRETZSCH, H. Analyzing the effect of stand density and site conditions on structure and growth of oak species using Nelder trials along and environmental gradient: experimental design, evaluation methods, and results. **Forest Ecosystems**, v. 5, p. 2-19, Dez. 2015.

VANCLAY, J. K. Experiment designs to evaluate inter- and intra-specific interactions in mixed plantings of forest trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, p. 366-374. Set. 2006.

VANCLAY, J. K.; LAMB, D.; ERSKINE, P. D.; CAMERON, D. M. Spatially explicit competition in a mixed planting of *Araucaria cunninghamii* and *Flindersia brayleyana*. **Annals of Forest Science**, v. 70, n. 6, p. 611-619, 2013.

VETTENRANTA, J. Distance-dependent models for predicting the development of mixed coniferous forests in Finland. **Silva Fennica**, v. 31, pp. 51-72, 1999.

WEBER, P.; BUGMANN, H.; FONTI, P.; RIGLING, A. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 254, p.96-106, Jan. 2008.

WEIGELT, A; JOLLIFFE, P. Indices of plant competition. **Journal of Ecology**, v. 91, p. 707-720, Set. 2003.

WEISKITTEL, A. P.; DAVID, W. H.; JOHN A.; KERSHAW, J. A. JR.; JEROME K.; VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Thomson Digital, Noida, India, 2011.

ZANINE, A. de M.; SANTOS, E. M. Competição entre espécies de plantas – Uma revisão. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v.11, n.1, p. 10-30. 2004.

CAPÍTULO III

DESEMPENHO DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS ESTIMADAS PELO MÉTODO DE AMOSTRAGEM DE PRODAN NO DELINEAMENTO SISTEMATICO DE NELDER

RESUMO

A utilização do método de amostragem de Prodan no delineamento sistemático de Nelder é uma boa alternativa para se obter as estimativas do número de árvores, área basal e volume por hectare, uma vez que não é necessário medir todas as árvores do experimento e contar o número de árvores nas unidades amostrais – UAs, distribuídas nos diferentes espaçamentos, o qual é sempre o mesmo. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento do método de amostragem de Prodan nas estimativas das variáveis número de árvores, área basal e volume total por hectare, nos diferentes espaçamentos do delineamento sistemático de Nelder implantados com clones de *Eucalyptus* spp. O trabalho foi desenvolvido com dados de um experimento com nove círculos de Nelder adaptados, estabelecidos na região Norte do estado do Tocantins, Brasil. As unidades amostrais foram instaladas fazendo-se uma adaptação do método de Prodan, cujas UAs foram compostas por oito árvores vizinhas mais próximas a uma árvore referência selecionada de maneira sistemática, de maneira a representar os diferentes espaçamentos. As variáveis dendrométricas mensuradas foram diâmetro a 1,30 m de altura do solo (d) e altura total (h). O volume das árvores (v) foi obtido aplicando-se a equação de Schumacher-Hall, ajustada pela empresa que conduziu o experimento. Os resultados para o número de árvores por hectare, área basal e volume por hectare foram calculados utilizando os estimadores do método de Prodan, adaptados à utilização de oito árvores no ponto amostral. A seleção do raio da oitava árvore foi efetuado aleatoriamente, uma vez que essa e a sétima árvore eram igualmente distantes em relação a árvore referência. As variáveis dendrométricas resultaram em comportamento decrescente em relação ao aumento de área vital por planta, apresentando os maiores valores nas menores classes de densidade. O número de árvores foi a variável mais influenciada pelo espaçamento e raio da octogésima planta. As estimativas de área basal e volume por hectare, além de serem afetadas pelo número de árvores, foram também influenciadas pelas características do material genético das plantas e mortalidade ou falhas em espaçamentos mais adensados. A amostragem de Prodan é um bom método para avaliar de círculos de Nelder, pois não há necessidade de medir todas as árvores presentes no experimento, além de ser mantido o número constante de árvores nas UAs nos diferentes espaçamentos.

Palavras-chave: Método de Prodan. Espaçamento variável. Estimativas por hectare.

CHAPTER III

**PERFORMANCE OF DENDROMETRIC VARIABLES ESTIMATED BY
PRODAN SAMPLING METHOD IN NELDER'S SYSTEMATIC DESIGN**

ABSTRACT

The use of the Prodan sampling method in Nelder's systematic design is a good alternative to estimate the number of trees, basal area and volume per hectare, since it is not necessary to measure all trees in the experiment and count the number of trees in the sample units - SUs, distributed in different spacings, which is always the same. The objective of this work was to evaluate the behavior of the Prodan sampling method in the estimates of the number of trees, basal area and total volume per hectare, in the different spacings of the Nelder systematic scheme implanted with *Eucalyptus* spp clones. The work was developed with data from an experiment with nine adapted Nelder circles, established in the northern region of the state of Tocantins, Brazil. The sample units were installed by adapting the Prodan method, whose SUs were composed of eight neighboring trees closer to a systematically selected reference tree in order to represent the different spacings. The measured dendrometric variables were diameter at 1.30 m of soil height (d) and total height (h). The volume of the trees (v) was obtained by applying the Schumacher-Hall equation, adjusted by the company that conducted the experiment. The results for the number of trees per hectare, basal area and volume per hectare were calculated using the Prodan method estimators, adapted to the use of eight trees at the sampling point. The selection of the radius of the eighth tree was performed randomly, since this and the seventh tree were equally distant in relation to the reference tree. Dendrometric variables resulted in decreasing behavior in relation to the increase of vital area per plant, presenting the highest values in the lowest density classes. The number of trees was the variable most influenced by the spacing and radius of the eighth plant. Estimates of basal area and volume per hectare, besides being affected by the number of trees, were also influenced by the characteristics of the genetic material of the plants and mortality or failures in denser spacings. Prodan sampling is a good method to evaluate Nelder circles, since there is no need to measure all the trees present in the experiment, besides maintaining the same number of trees in the SUs at different spacings.

Keywords: Prodan's method. Variable spacing. Estimates per hectare.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de sistemas mais produtivos tornam o monitoramento, o método e o processo amostral utilizados nos levantamentos florestais ferramentas essenciais para as caracterizações qualitativas e quantitativas do povoamento. Dessa maneira, o conhecimento sobre os métodos disponíveis para estimar as variáveis de interesse em inventários florestais permitem avaliar sua precisão, viabilidade de uso e confiabilidade (GOMES et al, 2011).

Dentre as técnicas de amostragem, a seleção de árvores proporcional à distância, também conhecidas como amostragem em k – árvores e amostragem ponto-árvore apresentam muitas vantagens, como a facilidade para a coleta de dados a campo, sua execução é mais rápida do que amostrar com parcelas de área fixa, uma vez que o número de árvores a ser medido em cada local é fixado antecipadamente e não é necessário a delimitação da unidade amostral, demandando baixo custo de execução (HAXTEMA et. al, 2012; KLEINN e VILCKO, 2016). Além dessas vantagens, Péllico Netto e Brena (1997) destacam que não ocorrem erros de demarcação das unidades amostrais e, com uma rede de pontos distribuídos dentro do povoamento, pode-se conseguir informações mais abrangentes deste espaço amostral.

No Brasil, o método de amostragem proporcional à distância mais difundido é o proposto por Prodan (1968), o qual considera a inclusão das seis árvores mais próximas de um ponto e a distância ou raio da sexta árvore como referência da unidade amostral. Prodan (1968) optou por esse número de árvores após avaliar o coeficiente de variação obtido para a variável volume, quando se inclui gradualmente árvores na unidade amostral, o que o tornou estável a partir da sexta árvore medida (PÉLLICO NETTO E BRENA, 1997).

Os trabalhos realizados com a utilização da amostragem de Prodan geralmente têm objetivo de compará-lo com outros métodos de amostragem de área variável, como o método de Bitterlich e Strand (GOMES et al., 2011; ARAÚJO et al., 2018), ou até mesmo com os métodos de área fixa (CESARO et al., 1994; MOSCOVICH et al., 1999; TÉO et al., 2014; MIRANDA et al., 2015). Entretanto, não são encontrados trabalhos que visam analisar o comportamento das estimativas das variáveis número de árvore, área basal e volume por hectare utilizando a amostragem de Prodan em diferentes espaçamentos.

Nelder (1962) apresentou um delineamento experimental que possibilita testar diferentes espaçamentos de plantio, onde as árvores são distribuídas em interseções de raios e arcos concêntricos, formando densidades distintas. O delineamento sistemático de Nelder apresenta vantagens quanto a compacidade, abrangência de pequenas áreas e fácil manejo.

Entretanto, devido ao fato de o experimento não ser aleatorizado, ocasiona insegurança nas análises estatísticas, na interpretação e na extrapolação dos resultados obtidos (STAPE, 1995).

No delineamento sistemático de Nelder as estimativas de variáveis como o número de árvores por hectare geralmente é efetuada utilizando a razão entre o valor de um hectare e a área individual por planta, e o volume é estimado utilizando modelos matemáticos que estimam este valor para a área de um hectare (AQUINO, 2018; RIBEIRO et al., 2017; ODA-SOUZA et al., 2008). Assim, aplicar um método de amostragem para obter as estimativas das variáveis número de árvores, área basal e volume por hectare no delineamento sistemático de Nelder se torna interessante do ponto de vista metodológico.

As características da amostragem de Prodan, mencionadas anteriormente, permitem a aplicação do método de forma adequada no delineamento de Nelder, pois o número de árvores amostradas é o mesmo em todas as unidades amostrais para os diferentes espaçamentos, ocorrendo, assim, redução da variabilidade entre as unidades amostrais, o que não seria possível com o método de área fixa, pois o número de árvores por unidade amostral é variável.

O trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento do método de amostragem de Prodan nas estimativas dos parâmetros dendrométricos: número de árvores, área basal e volume total por hectare, para clones de eucalipto em diferentes espaçamentos, no delineamento sistemático adaptado de Nelder.

2 MATEIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi desenvolvido com dados de um experimento com nove círculos de Nelder adaptados, implantados na região Norte do estado do Tocantins, BR, caracterizados no capítulo I.

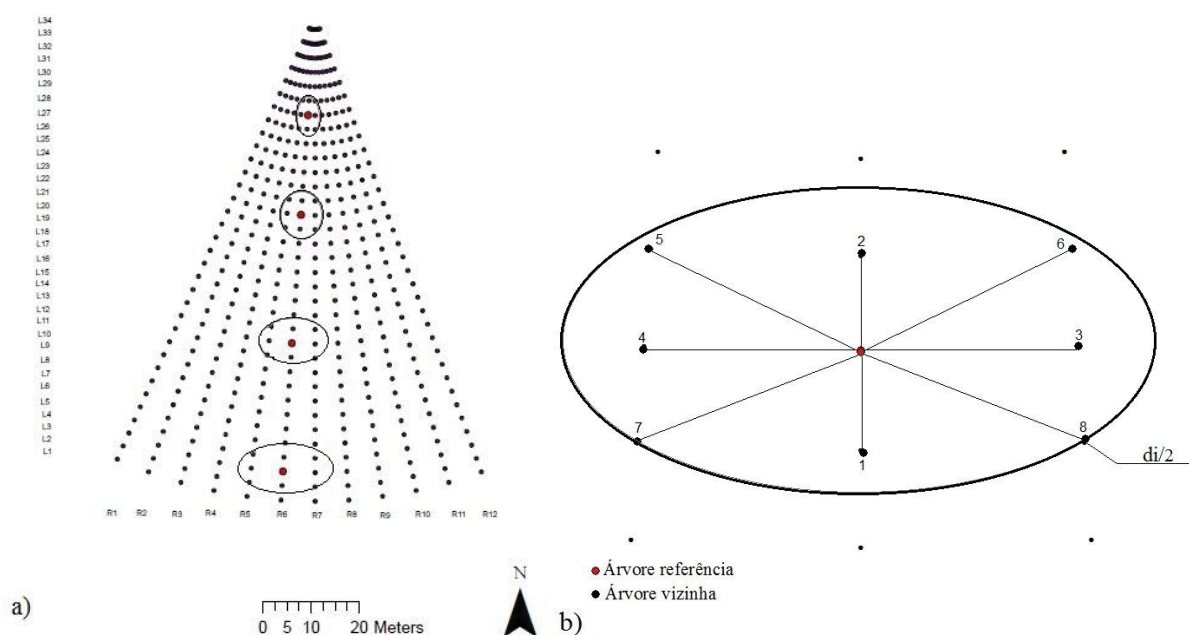
2.2 COLETA DE DADOS

As unidades amostrais foram instaladas fazendo-se uma adaptação ao método de Prodan ao tomar uma árvore como ponto central das unidades amostrais, denominada de árvore referência, e as demais árvores mais próximas dessa, denominadas de árvores vizinhas, compuseram a unidade amostral (FIGURA 1a). Com isso, as unidades amostrais dentro do delineamento adaptado de Nelder ficaram compostas por oito árvores vizinhas

mais próximas da árvore referência, totalizando nove árvores na unidade amostral. A árvore tomada como referência foi escolhida de maneira sistemática para retratar os diferentes espaçamentos, e não foi contabilizada nos cálculos das estimativas das variáveis em estudo.

Como referência para o tamanho da unidade amostral de Prodan é utilizada a distância ou o raio da sexta árvore, conforme citado por Péllico Netto e Brena (1997). Neste trabalho, entretanto, foi utilizada a distância da oitava árvore, sendo essa selecionada de maneira aleatória entre duas árvores (oitava e sétima), uma vez que, devido sua estrutura sistemática, o delineamento de Nelder possibilitou que duas árvores tivessem a mesma distância da árvore referência. A FIGURA 1b apresenta o croqui representativo de uma unidade amostral do método de Prodan, localizada na classe de maior espaçamento (IV) no delineamento sistemático de Nelder, considerando que não ocorreram falhas das árvores mais próximas.

FIGURA 1 – a) CROQUI REPRESENTATIVO DA DISPOSIÇÃO DAS UNIDADES AMOSTRAIS AO LONGO DOS RAIOS DE UM CLONE NO CÍRCULO DE NELDER ADAPTADO. b) CROQUI REPRESENTATIVO DE UMA UNIDADE AMOSTRAL PELO MÉTODO DE PRODAN, LOCALIZADA NA CLASSE DE ESPAÇAMENTO IV EM QUE DI É DIÂMETRO DA OITAVA ÁRVORE.



FONTE: O autor (2019).

As unidades amostrais foram dispostas de forma sistemática ao longo dos raios dos círculos de Nelder adaptado, de maneira a representar os diferentes espaçamentos. Foi alocada uma unidade amostral em cada classe de espaçamento, totalizando quatro unidades amostrais por clone. As classes de espaçamento são caracterizadas como:

- Classe I: Muito adensado, com área vital por planta menor que 5,9 m².
- Classe II: Adensado, com área vital por planta entre 6 m² a 10,9 m²;

- Classe III: Adensamento moderado, com área vital por planta entre 11 m² a 15,9 m²;
- Classe IV: Não adensado, com área vital por planta maior que 16 m².

As variáveis dendrométricas mensuradas foram diâmetro a 1,30 m de altura do solo (d), altura da copa (hc) e altura total (h). O volume das árvores (v) foi obtido utilizando o modelo de Schumacher-Hall, ajustado e cedido pela empresa detentora dos dados (1).

$$v = 0,000044487 d^{1,73714816} h^{1,17608127} \quad (1)$$

Em que: v é o volume total; d é o diâmetro a 1,3 m do solo (cm); h é a altura total (m).

2.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

A estimativa das variáveis dendrométricas número de árvores por hectare N , área basal G (m².ha⁻¹) e volume por hectare V (m³.ha⁻¹) foram calculadas utilizando os estimadores do método de Prodan, apresentado por Péllico Netto e Brena (1997). O número de árvores por hectare (2) e os valores de área basal (3) e volume (4) foram calculados utilizando o princípio de proporcionalidade, com adaptações para o número de oito árvores na unidade amostral.

$$N = \frac{(7,5).(10.000)}{\pi R_8^2} \quad (2)$$

$$\hat{G} = \frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + d_5^2 + d_6^2 + d_7^2 + \frac{d_8^2}{2}}{R_8^2} (2.500) \quad (3)$$

$$V = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 + \frac{v_8}{2}}{\pi R_8^2} (10.000) \quad (4)$$

Em que: N é o número de árvores por hectare; G é a área basal (m².ha⁻¹); V é o volume por hectare (m³.ha⁻¹); R_8 é o raio da oitava árvore (m); d_i é o diâmetro das n árvores (m); v_i é o volume estimado das n árvores (m³).

Para avaliar o comportamento da amostragem de Prodan nos diferentes espaçamentos foram utilizados diagramas de dispersão da relação entre as estimativas das variáveis número de árvore, área basal e volume por hectare e a área média por planta. Os círculos de Nelder adaptados foram implantados gradualmente, consequentemente os clones de eucalipto foram separados de acordo com a sua respectiva idade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estimativas médias das variáveis número de árvores, área basal e volume por hectare obtidas utilizando a amostragem de Prodan estão apresentadas na TABELA 1,

juntamente com os valores dos raios médios das oitavas árvores até o ponto central (árvore referência), nos diferentes espaçamentos.

Pode-se observar o aumento progressivo dos valores das variáveis área basal e volume até o quarto ano, sendo que nessa idade resultaram nos maiores valores para essas variáveis em todas as classes de espaçamento. A variável número de árvores por hectare resultou em valores bem próximos nas diferentes idades, não demonstrando o mesmo comportamento das demais variáveis avaliadas.

Nos círculos de Nelder com dois anos, o número de árvores por hectare mostrou-se superior em relação às demais idades nas unidades amostrais de todas as classes de espaçamento, ou seja, nessa idade as estimativas apresentaram maior densidade de plantas por hectare. Esses valores podem ser explicados devido ao valor do raio da oitava árvore, o qual apresentou valores levemente inferiores aos demais, pois segundo Kleinn e Vilcko (2006), para menores valores de distância (k) até a enésima árvore, quando o padrão espacial da espécie é agregado, geram valores elevados de $N \cdot ha^{-1}$.

As estimativas de área basal e volume por hectare no círculo de Nelder com cinco anos de idade apresentaram um decréscimo comparado aos valores das estimativas entre três a quatro anos. Esse fato deve-se possivelmente à diversidade de material genético e diferentes condições locais de crescimento, uma vez que os círculos de Nelder são integrados por diferentes clones e estão distribuídos em locais distintos.

Quanto aos resultados do raio da oitava árvore, os valores mantiveram o mesmo padrão nas diferentes idades para as classes de espaçamento, sendo observado um comportamento crescente desses valores com o aumento do espaçamento. Isso era evidentemente esperado, uma vez que o valor do raio é a distância do ponto central até a oitava árvore somada a metade do diâmetro dessa árvore.

TABELA 1 – VALORES MÉDIOS DAS VARIÁVEIS NAS DIFERENTES CLASSES DE ESPAÇAMENTO, PARA CLONES DE EUCALIPTO EM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO DE NELDER, NO ESTADO DO TOCANTINS.

Idade (Anos)	Variáveis	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
2	\bar{N}	2091	1328	747	455
	\bar{G}	7,26	8,67	6,66	5,14
	\bar{V}	44,81	55,67	41,51	34,87
3	\bar{N}	1850	1223	705	436
	\bar{G}	11,75	11,13	7,73	6,10
	\bar{V}	98,394	95,036	61,571	51,410
3,5	\bar{N}	2001	1271	708	430
	\bar{G}	18,92	16,22	12,49	9,10

	\bar{V}	177,851	160,256	123,241	86,811
	\bar{N}	1992	1256	696	423
4	\bar{G}	19,60	17,92	12,54	9,01
	\bar{V}	187,188	171,357	116,364	84,853
	\bar{N}	1711	1078	601	364
5	\bar{G}	15,11	16,39	10,37	7,83
	\bar{V}	138,138	166,436	99,191	73,909

FONTE: O autor (2019).

Em que: \bar{R}_8 é o raio médio da oitava árvore (m); \bar{N} é o número de árvores médio por hectare; \bar{G} é a área basal média ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$); \bar{V} é o volume médio por hectare ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

As variáveis área basal e volume por hectare resultaram em comportamentos semelhantes nas estimativas, cujos valores são decrescentes com o aumento do espaçamento, e resultaram em maiores valores nos menores espaçamentos, entre as classes I e II (FIGURAS 2 e 3). Apenas o clone A (N6), na idade de três anos e meio (FIGURA 2) apresentou o maior valor na classe de espaçamento III. Esse resultado, juntamente com os resultados dos demais clones que apresentaram os maiores valores de estimativas na classe II, está associado à porcentagem de mortalidade, que foi maior nas menores classes de espaçamento. Para Moraes (2006), os valores médios de volume e área basal por hectare apresentaram a mesma tendência de variação, com maiores valores nos espaçamentos mais adensados, em clones de eucalipto plantados sob diferentes espaçamentos na região Noroeste no estado de Minas Gerais. Nos espaçamentos mais reduzidos ocorre maior produção por unidade de área em função do maior número de indivíduos nesses espaçamentos (OLIVEIRA NETO et al., 2003; MORAES, 2006).

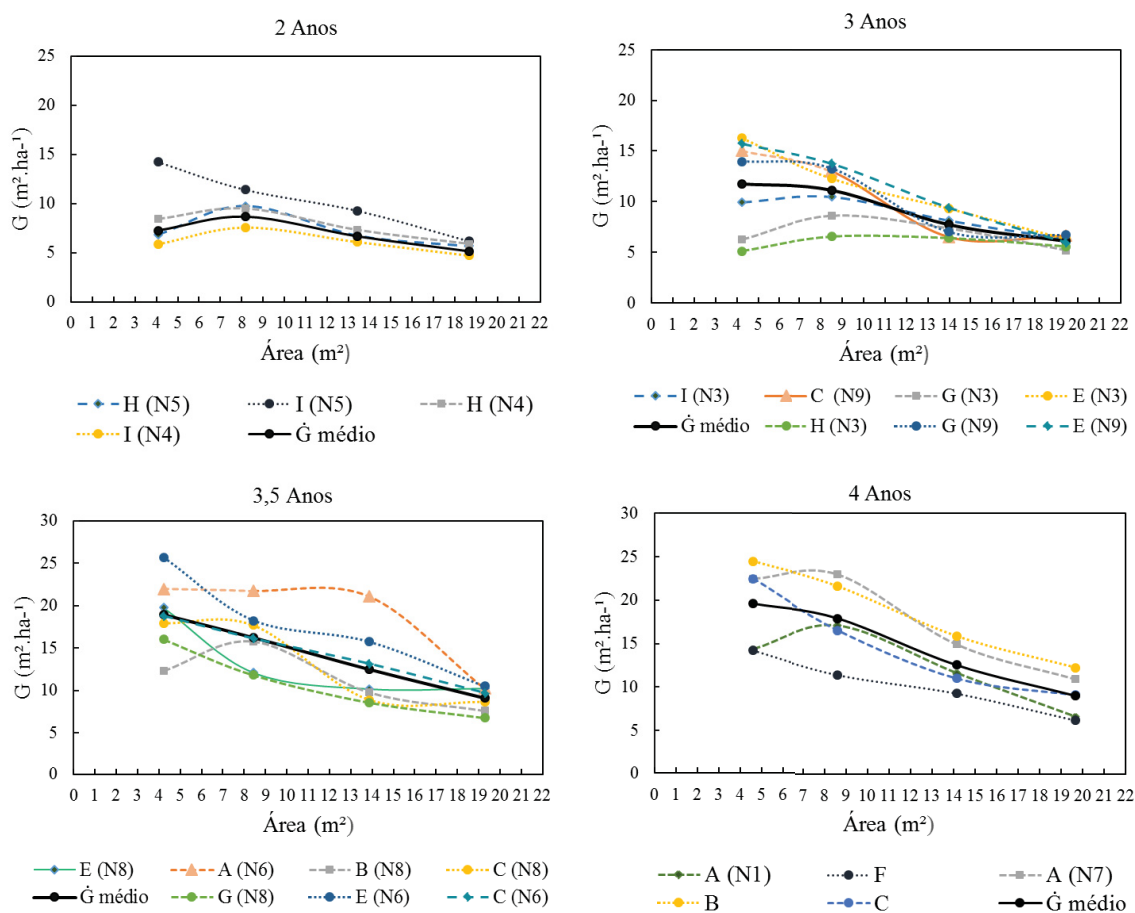
Ao analisar o comportamento das estimativas para área basal e volume por clone, nas idades de dois, três, três anos e meio e cinco anos (FIGURAS 2 e 3), as estimativas para cada clone apresentaram notável diferença nos menores espaçamentos, classe I e II. Essa diferença foi reduzida com o aumento do espaçamento, sendo que no maior espaçamento, (classe IV), os valores das estimativas dos clones se aproximaram. Esse fato pode ser explicado devido à maior porcentagem de mortalidade nos menores espaçamentos, que foi distinta entre os clones.

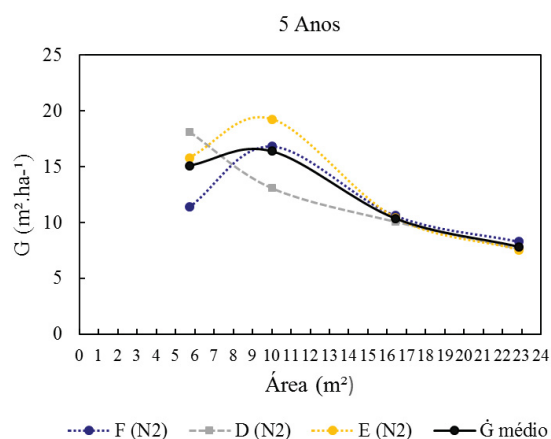
Para os clones com idade de quatro anos, as estimativas de área basal e volume por hectare também apresentam esse comportamento, porém ocorreu pouca redução na diferença entre os valores estimados com o aumento do espaçamento. Além da mortalidade, as características genéticas e o potencial de adaptabilidade entre os clones podem ter influenciado nesse comportamento.

O comportamento das estimativas para os diferentes clones e idades foi semelhante, porém alguns clones se comportaram melhor que os demais. Para a variável área basal (FIGURA 2), os clones I (N5) aos dois anos, E (N9), E (N3), I (N3) e C (N9) aos três anos, E (N6) e G (N6) aos três anos e meio, B (N7) e A (N7) aos 4 anos apresentaram valores superiores aos demais. Os clones E (N2) e F (N2) com idade de cinco anos apresentaram valores muito semelhantes, o clone E (N2) apresentou valores superiores nas classes I e II. Já o clone D (N2) apresentou valor superior na classe I e valores inferiores aos dos clones E (N2) e F (N2) nas demais classes.

Os clones citados apresentaram a mesma tendência nas estimativas volumétricas, com destaque na idade de dois anos, em que todos os clones apresentaram valores muito próximos (FIGURA 3). Esse comportamento pode estar relacionado às características genéticas dos clones e potencial de adaptabilidade das árvores. Este potencial expressa a capacidade de adaptação e o vigor das mudas diante das condições ecológicas observadas pós-plantio (MACEDO et al., 2000).

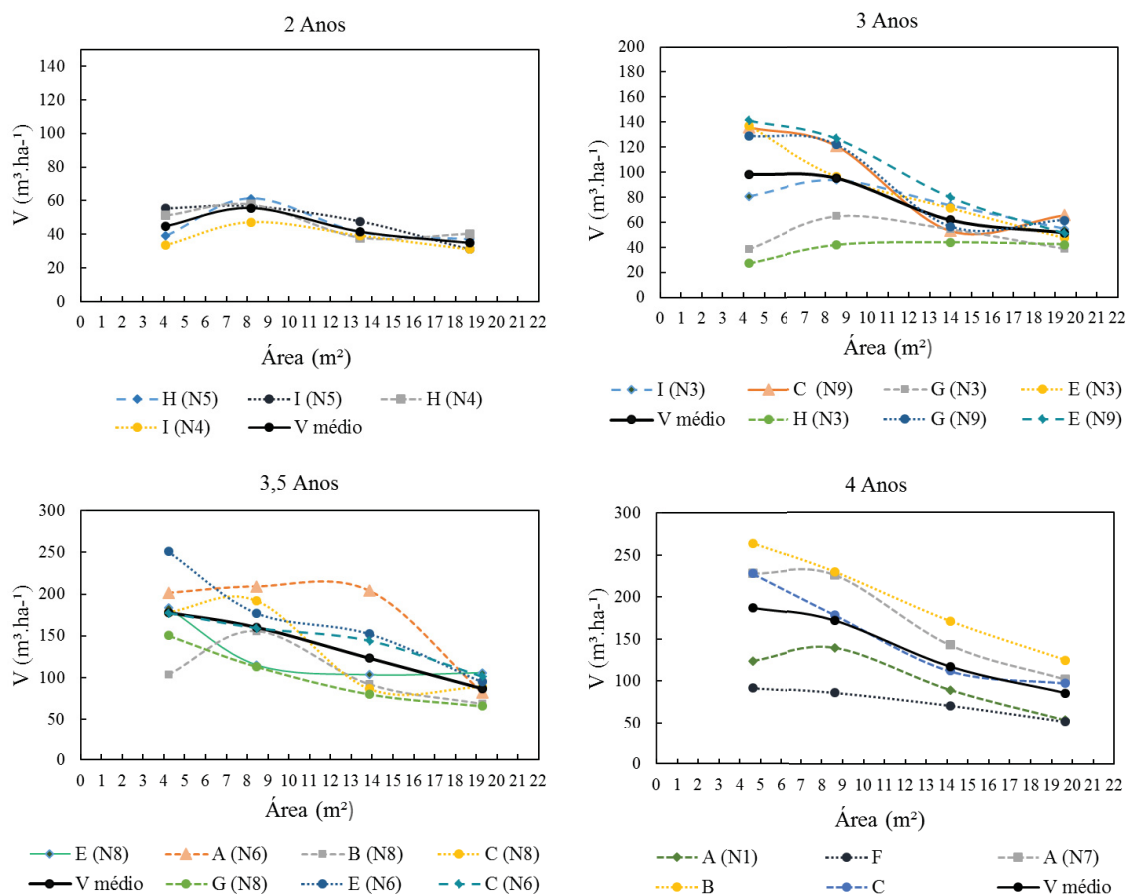
FIGURA 2 – ESTIMATIVAS DA VARIÁVEL ÁREA BASAL ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$) POR CLONE E MÉDIA POR HECTARE PARA OS CLONES DE EUCALIPTO NOS CÍRCULOS DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.

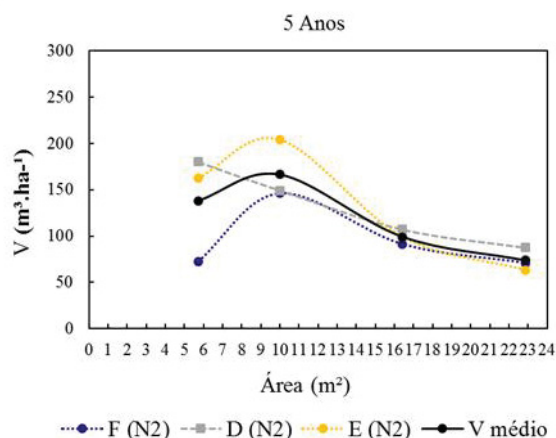




FONTE: O autor (2019).

FIGURA 3 – ESTIMATIVAS DA VARIÁVEL VOLUME ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) POR CLONE E MÉDIA POR HECTARE PARA OS CLONES DE EUCALIPTO NOS CÍRCULOS DE NELDER LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.

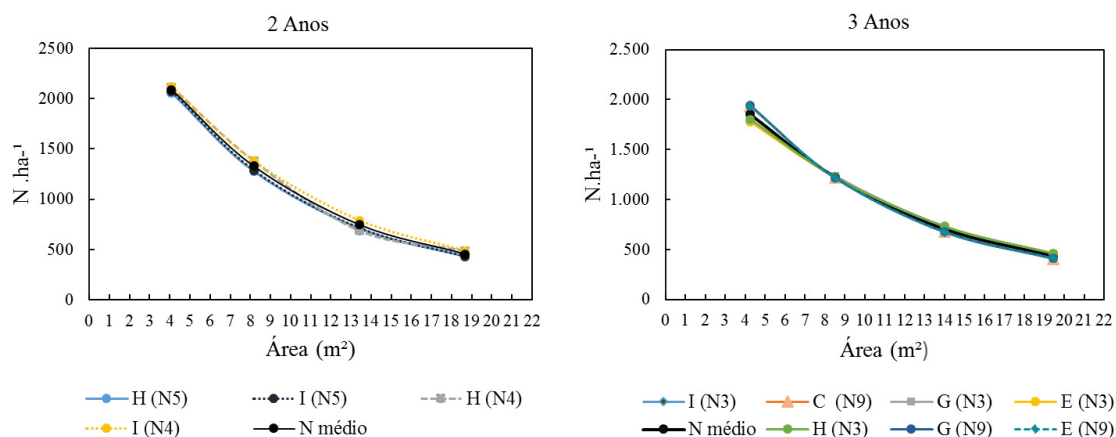


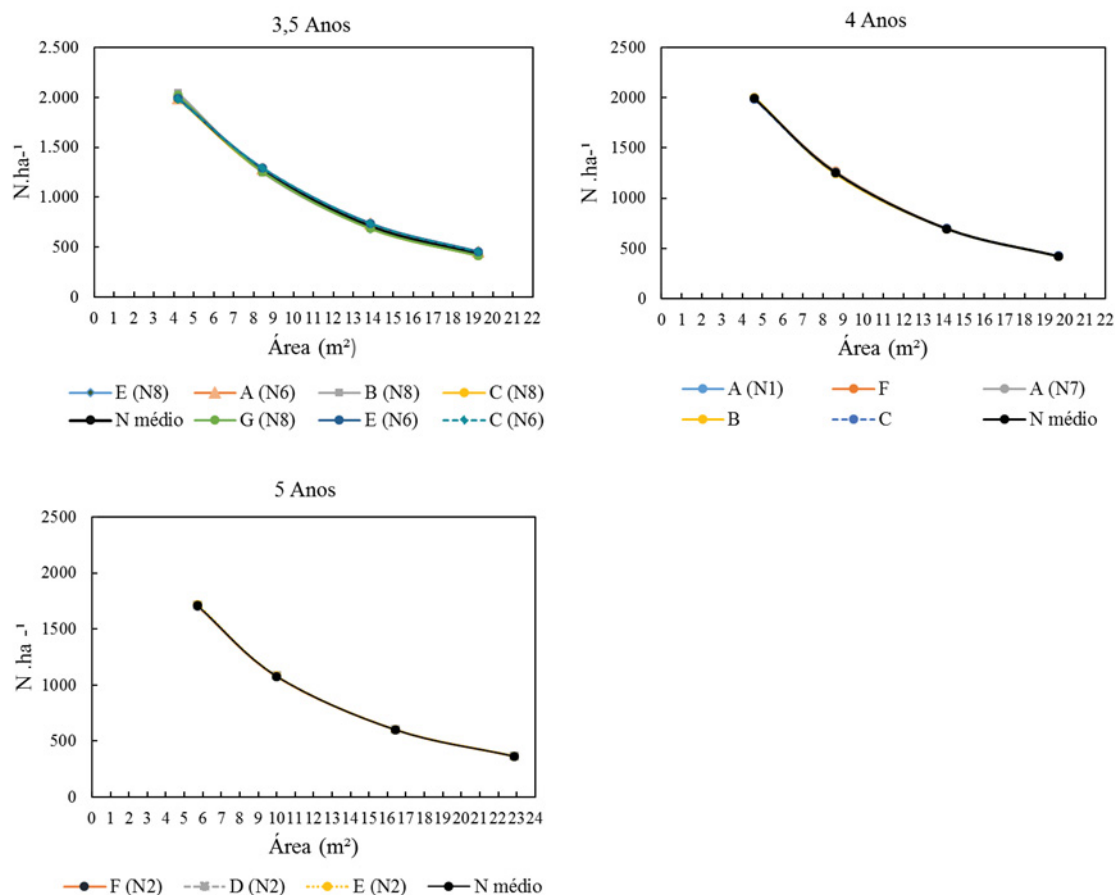


FONTE: O autor (2019).

As estimativas do número de árvores por hectare também apresentaram comportamento decrescente com o aumento da área vital, para os clones de todas as idades, resultando em maior quantidade de árvores na classe de espaçamento I (FIGURA 4). Consequentemente, com o aumento do espaçamento o número de árvores por hectare diminuiu. Isso demonstra que o número de árvores por hectare é mais sensível e influenciado pelo espaçamento e pelo raio da oitava árvore da amostra do que a área basal e o volume por hectare. Isso também foi observado por Araújo et al. (2018), os quais afirmam que plantas mais distantes do ponto amostral provocam aumento no denominador do estimador e, consequentemente, redução do número de plantas estimado. Loetsch et al. (1973) mencionam a importância em se considerar que distâncias menores são mais sensíveis ao tipo de distribuição espacial da população.

FIGURA 4 – ESTIMATIVAS DA VARIÁVEL NÚMERO DE ÁRVORES ($N \cdot \text{ha}^{-1}$) POR CLONE E MÉDIA POR HECTARE PARA OS CLONES DE EUCALIPTO NOS CÍRCULOS DE NELDER, LOCALIZADOS NO ESTADO DO TOCANTINS.





FONTE: O autor (2019).

Embora a maioria dos trabalhos que utilizou o método de amostragem de Prodan tenham sido realizados em florestas nativas (MOSCOVICH et al., 1999; PÉLLICO NETTO et al., 2012; TÉO et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2015; ARAÚJO et al., 2018), comparando-o com outros métodos de amostragem, alguns autores encontraram tendenciosidade nas suas estimativas. Péllico Netto et al. (2012), ao quantificarem os parâmetros dendrométricos em árvores de araucárias nativas com o uso do Método de Prodan, encontraram subestimativa para o volume total e superestimativa para espécies de baixa dominância. Araújo et al. (2018) concluíram que o método de Prodan gerou superestimativa do número de plantas por hectare nos casos em que as plantas de regeneração natural de *Eremanthus erythropappus* apresentaram padrão de distribuição agregado. Nascimento et al. (2015) encontraram superestimativas para as variáveis número de árvores, área basal e volume por hectare em um fragmento Floresta Ombrófila Mista, no estado do Paraná.

De acordo com Loetsch et al. (1973), valores de tendenciosidade nas estimativas das variáveis podem ser explicados, em parte, pela heterogeneidade que as distâncias entre as plantas apresentam em florestas nativas e pelo padrão de distribuição das espécies. Os

métodos de amostragem que se baseiam nas distâncias entre as plantas propiciam bons resultados somente quando a população é homogênea (LOETSCH et al., 1973). No delineamento sistemático de Nelder, apesar de apresentar diferentes espaçamentos, a distância entre as árvores presentes nas unidades amostrais exibe pouca variação, permitindo que o tamanho da unidade amostral - UA, definido pela distância do ponto central até a enésima árvore, seja coerente com o espaçamento do local, assim, o método de amostragem de Prodan gerou boas estimativas para o delineamento.

Miranda et al. (2015) analisaram diferentes métodos de amostragem em povoamento de teca com 12 anos de idade e área vital de 6 m², e encontraram N.ha⁻¹ estimado pela amostragem de Prodan de 1.125. Esse valor está próximo e coerente aos valores encontrados na classe II, a qual apresenta esse espaçamento como limite inferior da classe. Os autores relataram, ainda, que o método de Prodan resultou no menor tempo de medição quando comparado com os métodos de área fixa e Bitterlich. Gomes et al. (2011) compararam os métodos de amostragem de área variável de Bitterlich e Prodan e recomendaram o método de Prodan, pois foi o mais exato e cobriu melhor a área, enquanto que os métodos avaliados de Bitterlich e Prodan apresentaram mesma eficiência nas estimativas do volume.

A praticidade e facilidade de implantação e utilização de amostragem proporcional à distância em distintas condições de campo a torna uma boa opção de amostragem (KLEINN e VILCKO, 2006). Além disso, os resultados obtidos com aplicação do método de amostragem de Prodan no delineamento sistemático de Nelder permitiu visualizar o comportamento dos estimadores desse método em diferentes espaçamentos, resultando em valores de estimativas decrescentes com o aumento dos espaçamentos para as variáveis em estudo: número de árvores, área basal e volume por hectare.

O comportamento decrescente nas estimativas das variáveis número de árvores e volume por hectare foi observado também nos trabalhos de Aquino (2018), Ribeiro et al. (2017), Oda-Souza et al. (2008), que utilizaram o método tradicional de razão entre o valor de um hectare e a área individual por planta para estimar o número de árvores por hectare, e modelos matemáticos para estimar o volume por hectare, em delineamento sistemático de Nelder. Com isso, o método de amostragem de Prodan mostra-se eficiente e prático para obter as estimativas das variáveis número de árvores, área basal e volume em delineamento sistemático de Nelder.

4 CONCLUSÕES

O comportamento das variáveis é decrescente em relação ao aumento de área vital por planta, apresentando os maiores valores nas menores classes de densidade.

O número de árvores é a variável mais influenciada pelo espaçamento e raio da enésima planta, e não apresentou variação para os diferentes clones.

As estimativas de área basal e volume por hectare, além de serem afetadas pelo número de árvores, são também influenciadas pelas características do material genético das plantas e mortalidade ou falhas em espaçamentos adensados.

A amostragem de Prodan é um bom método para avaliar de círculos de Nelder, pois não há necessidade de medir todas as árvores presentes no experimento, além de ser mantido o número constante de árvores nas UAs nos diferentes espaçamentos.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, P. S. **Crescimento inicial de eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo “leque”**. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- ARAÚJO, E. J. G; PÉLLICO NETTO, S; MORAES, V. A; DAVID, H. C; CURTO, R. de A; SCOLFORO, J. R. S. Métodos de amostragem de área variável para a regeneração natural de *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish. **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 2, p. 265-276, abr./jun. 2018.
- CESARO, A. De; ENGEL, O. A; FINGER, C. A. G; SCHNEIDER, P. R. comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia e de seis árvores, quanto a eficiência, no inventário florestal de um povoamento de *Pinus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.4, n.1, p. 97-108, 1994.
- GOMES, K. B; MACHADO FILHO, A; SILVA, V. P; SILVA, A. G. da. Comparação dos Métodos de Amostragem Casual Simples: Bitterlich e Prodan. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v.3, p. 101-104, abr. 2011.
- HAXTEMA, Z; TEMESGEN, H; MARQUARDT, T. Evaluation of n-tree distance sampling for inventory of headwater riparian forests of western Oregon. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 27, p. 109-117, jul. 2012.
- KLEINN, C; VILČKO, F. A new empirical approach for estimation in k-tree sampling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 237, p. 522-533, Dec. 2006.
- LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest Inventory**. Wien: BLV Verlagsgesellschaft München. 1973. 469 p
- MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; GOMES, J. E.; LIMA, E. M. G. Potencial de estabelecimento de clones de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (seringueira) introduzidos em sistemas agroflorestal com *Bertholletia excelsa* Humb. e Bompl. (Castanheira do Brasil), em Lavras-MG, In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE FLOESTAS, 2000, Porto Seguro, BA. **Anais...** Rio de Janeiro: Biosfera, 2000. P. 159-161.
- RIBEIRO, M. D. dos S. B.; JORGE, L. A. B.; MISCHAN, M. M.; SANTOS, A. L. dos; BALLARIN, A. W. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de Eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n.1, p. 31-45, jan./mar. 2017.
- MIRANDA, D. L. C.; FRANCIO, J.; SANTOS, SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. Precisão e eficiência relativa de métodos de amostragem em teca. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 247-254, jul./set. 2015
- MORAES, V. de M. **Dinâmica de crescimento de clones de eucalipto clonal sob diferentes espaçamentos, na região noroeste do estado de minas gerais**. 76 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2006.

MOSCOVICH, F. A.; BRENA, D. A.; LONGHI, S. J. Comparação de diferentes métodos de amostragem, de área fixa e variável, em uma floresta de *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.2, n.1, p. 173-191, 1999.

NASCIMENTO, R. G. M.; SILVA, L. C. R. da; BARBEIRO, L. da S. S.; WOJCIECHOWSKI, J. C.; PÉLLICO NETTO, S.; MACHADO, S. do A. Efeito da árvore marginal nos estimadores populacionais obtidos por métodos de amostragem de área variável. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 1, p. 125-131, 2015.

NELDER, J.A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, Washington, v.18, n.3, p. 283-307, set. 1962.

ODA-SOUZA, M.; BARBIN, D.; RIBEIRO JR, P. J.; STAPE, J. L. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 499-509, Mai/Jun. 2008.

OLIVEIRA NETO, S. N. de; REIS, G. G. dos; REIS, M. das G. F; NEVES, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, Viçosa, vol.27, n.1, p.15-23, 2003.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. Curitiba, 1997. 316 p.

PÉLLICO NETTO, S; ORELLANA, E; STEPKA, T. F; LIMA, R; FIGUEIREDO FILHO, A. Comportamento probabilístico dos raios das sextas árvores no método de Prodan e estimativas dos parâmetros dendrométricos para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze nativa. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 517-524, dez. 2012.

PRODAN, M. **Forest biometrics**. Oxford, Pergamon Press, 1968. 447 p.

STAPE, J. L. **Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

TÉO, S. J; SCHNEIDER, C. R; FIORENTIN, L. D; COSTA, R. H. da. Comparação de métodos de amostragem em fragmentos de Floresta Ombrófila Mista, em Leblon Régis, SC. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 44, n. 3, p. 3. 93 - 402, jul. / set. 2014.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

5.1 COMPETIÇÃO

Neste trabalho foi desenvolvido e apresentado um novo índice para avaliar a competição de árvores em diferentes espaçamentos (*IC proposto*). A formulação matemática utilizada para calcular o índice e a escala padronizada dos resultados, com variação entre zero a um, demonstraram praticidade e facilidade quanto a aplicação e interpretação, e superioridade nos resultados em relação aos índices tradicionais testados.

O *IC proposto* foi aplicado em espaçamentos distintos, propiciados pelo delineamento sistemático de Nelder. Entretanto, trabalhos futuros podem ser realizados, com a aplicação dessa metodologia em outros tipos florestais, como em florestas nativas e plantadas, por exemplo, desde que as características espaciais das florestas sejam consideradas para aprimorar o *IC proposto*, com as devidas adaptações para se obter resultados consistentes em cada uma das condições florestais específicas.

O desempenho do *IC proposto* também pode ser testado em modelos de crescimento, visando utilizá-lo como uma das variáveis dos modelos de prognose do crescimento e mortalidade de árvores individuais.

5.2 ESPAÇAMENTO

Esta pesquisa evidenciou que as estimativas para área basal e volume por hectare, obtidas pelo método de amostragem de Prodan, resultam em maior produtividade por unidade de área nos espaçamentos mais adensados. Porém, o percentual de mortalidade e a competição também são maiores nesses espaçamentos. Já as variáveis dendrométricas diâmetro e volume apresentaram resultados maiores nos espaçamentos mais amplos. Diante disso, é necessário definir os objetivos do plantio e escolher o espaçamento adequado, uma vez que a escolha inadequada pode interferir na produção e nos tipos de produtos almejados.

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Nesta pesquisa foi utilizada a análise de perfil multivariada como uma alternativa para analisar os dados com o problema de autocorrelação. Outra análise estatística que pode ser empregada nesse tipo de dados, em futuras pesquisas, é a modelagem de efeito misto, na qual estão presentes fatores fixos e aleatórios, possibilitando a modelagem da autocorrelação entre árvores. Tal análise tem sido correntemente empregada na área florestal para analisar dados com medidas repetidas, como dados de afilamento e de crescimento e produção.

5.4 CLONES DE *Eucalyptus* spp.

Considerando-se os resultados obtidos para os clones com a análise de perfil multivariada, o percentual de mortalidade e a estimativa por hectare com a amostragem de Prodan, foram levantados os seguintes apontamentos para os clones de Eucalipto:

O clone I, *Eucalypto platyphylla*, com características de média produtividade e alta resistência à seca, apresenta comportamento superior aos demais clones testados nas idades de dois e três anos, com maior desempenho nos espaçamentos mais amplos. A mortalidade para esse clone foi baixa, indicando boa adaptabilidade ao local. A produtividade em área basal e volume por hectare, mostrou-se superior à observada nos demais clones, mantendo-se esse padrão para as idades futuras, sendo este clone, conseqüentemente, o mais indicado para o local em estudo.

O clone A, híbrido de *Urograndis*, com características de alta produtividade e média resistência à seca, é recomendado para plantios de alta densidade, uma vez que apresentou valores consideráveis para as variáveis dendrométricas, e boas estimativas por hectare nos espaçamentos adensados.

Os clones híbridos de *Urograndis* C, D, E, G e J, com características de alta produtividade e média a baixa resistência a seca, não se diferiram estatisticamente dos demais clones. O percentual de mortalidade para esses clones foi moderado a alto, e a produtividade em volume por hectare foi moderada. Clones que apresentam média a alta resistência à seca, para reduzir a perda de árvores e com espaçamentos menos adensados, são recomendados para a região em estudo.

Os clones F, B e H (híbrido de *Urocam*, Híbrido de *Urograndis* e *Eucalipto platyphylla* respectivamente) não são indicados para a área em estudo, pois apresentaram desempenho inferior aos demais clones, quanto ao comportamento das variáveis altura, diâmetro e volume e baixas estimativas de área basal e volume por hectare.

REFERÊNCIAS GERAIS

AAKALA, T; FRAVER, S; D'AMATO, A. W; PALIK, B. J. Influence of competition and age on tree growth in structurally complex old-growth forests in northern Minnesota, USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 308, p. 128-135, Nov. 2013.

ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012. ABRAF – Brasília, 2013.

ALEIXO, V. **Desenvolvimento de *Jatropha curcas* (L.) em função da procedência, sistema de cultivo e densidade**. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2012.

AQUINO, P. S. R. **Crescimento inicial de eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo “leque”**. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ARAÚJO, E. J. G; PÉLLICO NETTO, S; MORAES, V. A; DAVID, H. C; CURTO, R. de A; SCOLFORO, J. R. S. Métodos de amostragem de área variável para a regeneração natural de *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish. **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 2, p. 265-276, Abr./Jun. 2018.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 506 p. 1970.

BEGON, M; TOWNSEND, C. R; HARPER, J. L. **Ecology: From Individuals to Ecosystems** (4 ed.), Blackwell Science, Malden, EUA, 2006.

BERGER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HASELEIN, C. R. Efeito do espaçamento e da adubação do crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.2, p.75 – 87, 2002.

BÉRUBÉ-DESCHÊNES, A; FRANCESCHINI, T; R. SCHNEIDER, R. Quantifying competition in white spruce (*Picea glauca*) plantations. **Forest Science**, v. 74, p. 26, Jun. 2017.

BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. Evaluation of Competition Indices in Individual Tree Growth Models. **Forest Science**, v. 41, n. 2, p. 360-377, 1995.

BLOG DA INFLOR Forest. Vitória, ES. Não Paginado. Disponível em: www.inflor.com.br. Acesso em: 18 nov. 2018.

BRITO, A. de; FERREIRA, M. Z.; MELLO, J. M. de; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA A. D. de. ACERBI JÚNIOR, F. W. Comparação entre os métodos de quadrantes e Prodan para análises florística, fitossociológica e volumétrica. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 399-405, out. /dez. 2007.

CESARO, A. De; ENGEL, O. A; FINGER, C. A. G; SCHNEIDER, P. R. comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia e de seis árvores, quanto a eficiência, no

- inventário florestal de um povoamento de *Pinus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.4, n.1, p. 97-108, 1994.
- CLARK, P.J.; EVANS, F.C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. **Ecology**, v. 35, p. 445–453, 1954.
- COELHO, A. S. R.; MELO, H. A.; SIMÕES, J. W. Comportamento de espécies de eucaliptos face ao espaçamento. **IPEF** n.1, p.29-55, 1970.
- CONTRERAS, M. A; AFFLECK, D; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, pp. 1939-1949, Dez. 2011.
- CURTO, R. de. A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- DANIEL, T.W., HELMS, J.A., BACKER, F.S. **Principles of silviculture**. New York: McGraw-Hill, 1979.
- DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal Forest Research**, Vancouver, v. 16, p. 1230-1237, 1986.
- DAS, A; BATTLES, J; STEPHENSON, N. L; VAN MANTGEM, P. J. The contribution of competition to tree mortality in old-growth coniferous forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 261 p. 1203-1213, Abr. 2011.
- DIACI, J. **Nature-based forestry in Central Europe: Alternatives to industrial forestry and stringent preservation.** Studia forestalia Slovenica 126, Faculdade Biotécnica, Universidade de Ljubljana. 2006.
- ELOY, E.; CARON, B. O.; TREVISAN, R.; SCHMIDT, D.; ZANON, M. L. B.; BEHLING, A.; MONTEIRO, G. C. Variação longitudinal e efeito do espaçamento na massa específica básica da madeira de *Mimosa scabrella* e *Ateleia glazioviana*. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 2, p. 327 - 334, 2013.
- FABER, P.J.A distance-dependent model of tree growth. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 41, p. 111-123, 1991.
- FOX, J. C.; BI, H.; ADES, P. K. Spatial dependence and individual-tree growth models II. Modelling spatial dependence. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 245, p. 20–30, Jun. 2007.
- FOX, J.C.; ADES, P.K.; BI, H. Stochastic structure and individual-tree growth models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.154, p. 261–276, Nov. 2001.
- FREEMAN, G. H. The use of systematic design for a spacing trial with a tropical tree crop. **Biometrics**, Washington, v. 20, n. 1, p. 200-203, mar. 1964.

GLOVER, G. R.; Hool, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, Oxford, v. 25, p. 275–282, 1979.

GOMES, K. B; MACHADO FILHO, A; SILVA, V. P; SILVA, A. G. da. Comparação dos Métodos de Amostragem Casual Simples: Bitterlich e Prodan. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v.3, p. 101-104, Abr. 2011.

GONÇALVES, J. L. de M; ALVARES, C. A. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6-27, ago. 2013.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; J-P BOUILLET, J. P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Africa do Sul, v. 70, 105-118 Dez. 2008.

HAXTEMA, Z; TEMESGEN, H; MARQUARDT, T. Evaluation of n-tree distance sampling for inventory of headwater riparian forests of western Oregon. **Western Journal of Applied Forestry**, v. 27, p. 109-117, Jul 2012.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J. **Growth models for tree and stand simulation**. Stockholm Sweden: Royal College of Forestry, p. 74-90. 1974.

HOLZWARTH, F; RÜGER, N; WIRTH, C. Taking a closer look: disentangling effects of functional diversity on ecosystem functions with a trait-based model across hierarchy and time. **Royal Society Open Science**, v. 2, p. 1- 19, Mar. 2015.

HU, D; HU, F; ZENG, F; WANG, K; PENG, W; ZHANG, H; ZENG, Z; ZHANG, F; SONG, T. Spatial distribution of tree species in evergreen-deciduous broadleaf karst forests in southwest China. **Scientific Reports** v. 7, Nov. 2017

HUI, G.; WANG, Y.; ZHANG, G.; ZHAO, Z.; BAI, C.; LIU, W. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests. **Forest Ecology and Management**, v. 422, p. 49-58, Ago. 2018.

HUMMEL, S. Height, diameter and crown dimensions of *Cordia alliodora* associated with tree density. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 127, p. 31-40, Mar. 2000.

JANE, K; GUNSTA, V; WEISBERGA, P. J; YANG, J; FANC, Y. Do denser forests have greater risk of tree mortality: A remote sensing analysis of density-dependent forest mortality. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 359, p. 19-32, Jan. 2016.

JESUS, F. P. G. de. **Plantio de eucalipto no sul do estado do Tocantins: desafios e oportunidades**. 59 f. Trabalho de Graduação (Especialista em Gestão Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

JIANG, X; HUANG, J. G; CHENG, J; DAWSON, A; STADT, K. J; COMEAU, P. G; CHENF, H.Y.H. Interspecific variation in growth responses to tree size, competition and climate of western Canadian boreal mixed forests. **Science of the Total Environment**, v. 631–632, p. 1070-1078, Ago. 2018.

KEDDY, P.A. **Competition**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p. 333-404. 2001.

KLEINN, C.; VILČKO, F. A new empirical approach for estimation in k-tree sampling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 237, p. 522-533, Dec. 2006.

LAND, S. B. Jr.; NANCE, W.L. Apa: a useful tool for analyses of progeny tests. In: SOUTHERN FOREST TREE IMPROVEMENT CONFERENCE, 19, College Station, 1987. **Proceedings**, New Orleans, SFES, p.300-11, 1987.

LEITE, F. P.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SANS, L. M. A.; FABRES, A. S. Relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 9-16, 1999.

LEMMON, P. E.; SCHUMACHER, F. X. Stocking density around ponderosa pine trees. **Forest Science**, v.8, p. 397–402, 1962.

LIMA, M. O. L. 2017. **Dinâmica da distribuição diamétrica e prognose do crescimento de eucalipto em diferentes espaçamentos para multiprodutos**. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest Inventory**. Wien: BLV Verlagsgesellschaft München. 469 p, 1973.

LOONEY, C. E; D'AMATO, A. W; PALIK, B. J; FRAVER, S. KASTENDICK, D. N. Size-growth relationship, tree spatial patterns, and tree-tree competition influence tree growth and stand complexity in a 160-year red pine chrono sequence. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 424, p. 85-94, Set. 2018.

LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 6, p. 343-360, 1983.

LUU, T. C; BINKLEY, D; STAPE, J. L. Neighborhood uniformity increases growth of individual Eucalyptus trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 289, p. 90-97, Fev. 2013.

MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; GOMES, J. E.; LIMA, E. M. G. Potencial de estabelecimento de clones de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (seringueira) introduzidos em sistemas agroflorestal com *Bertholletia excelsa* Humb. e Bompl. (Castanheira do Brasil), em Lavras-MG, In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE FLOESTAS, 2000, Porto Seguro, BA. **Anais...** Rio de Janeiro: Biosfera, 2000. P. 159-161.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 9, p. 1089-1098, 2011.

MARTINS, R. J.; SEIXAS, F. S.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um “harvester” trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 83, p. 253- 263, set. 2009.

MIRANDA, D. L. C.; FRANCIO, J.; SANTOS, SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. Precisão e eficiência relativa de métodos de amostragem em teca. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 247-254, jul./set. 2015

MIRANDA, R. O. V. de. **Modelagem de árvores individuais para povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MONTEIRO, R. F. R.; CORDEIRO, J. A. Ensaio conjugado de espaçamento de métodos de desbastes em *Pinus elliottii* Engelm. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 361-363, 1983.

MOORE, J. A.; BUDELSKY, C. A.; SCHLESINGER, R. C. A New Index Representing Individual Tree Competitive Status. **Canadian Journal Forest Research**, v. 3, n. 4, p. 495-500, 1973.

MORAES, M. A.; MORAES, S. M. B.; SILVA, E. C. B.; KUBOTA, T. Y. K.; SILVA, A. M.; RESENDE, M. D. V.; MORAES, M. L. T. Variação genética em progênies de *Jacaranda cuspidifolia* Mart. utilizando o delineamento sistemático tipo “leque”. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p.175-183, jun. 2013.

MORAES, V. de M. **Dinâmica de crescimento de clones de eucalipto clonal sob diferentes espaçamentos, na região noroeste do estado de minas gerais.** 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2006.

MORAN, P. A. F. Notes on continous stochastic phenomena. **Biometrika**, London, v. 37, n. 2, p.17-23, 1950.

MOSCOVICH, F. A.; BRENA, D. A.; LONGHI, S. J. Comparação de diferentes métodos de amostragem, de área fixa e variável, em uma floresta de *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.2, n.1, p. 173-191,1999.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. DE C. O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.39, n.1, p.199-208, Jan/Fev. 2015.

MUGASHA, A. G. Evaluation of simple competition indices for the prediction of volume increment of young jack pine and trembling aspen trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 26, p. 227-235, 1989.

MUNRO, D. D. Forest growth model – a prognosis. In: Fries J (ed) Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forestry, Stockholm, p. 7–21, 1974.

NAMKOONG, G. Application of Nelder's designs in tree improvement research. In: SOUTHERN CONFERENCE ON FOREST TREE IMPROVEMENT, Savannah. **Proceedings...** Macon: SCFTI, p. 24-37, 1966.

NASCIMENTO, R. G. M.; SILVA, L. C. R. da; BARBEIRO, L. da S. S.; WOJCIECHOWSKI, J. C.; PÉLLICO NETTO, S.; MACHADO, S. do A. Efeito da árvore marginal nos estimadores populacionais obtidos por métodos de amostragem de área variável. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 1, p. 125-131, 2015.

NELDER, J.A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, Washington, v.18, n. 3, p. 283-307, 1962.

NEWNHAM, R. M. The development of a stand model for Douglas fir. 201 f. Ph.D. thesis, University of British Columbia, 1964.

ODA-SOUZA, M.; BARBIN, D.; RIBEIRO JR, P. J.; STAPE, J. L. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 499-509, Mai/Jun. 2008.

OLIVEIRA NETO, S. N. DE; REIS, G. G. DOS; REIS, M. DAS G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região do cerrado de Minas Gerais. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 755-762, out/dez. 2010.

OLIVEIRA NETO, S. N. de; REIS, G. G. dos; REIS, M. das G. F; NEVES, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n.1, p.15-23, 2003.

OLIVEIRA, T. K. de; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M. Desempenho silvicultural e produtivo de Eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema Agrossilvipastoril. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.60, p. 01-09 Dez. 2009.

PANETSOS, C. P. Selection of new poplar clones under various spacings. **Silvae Genética** [s], n.29, p.130-135, 1980.

PELISSARI, A. L. **Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L. f.** 119 f. Tese - (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PÉLLICO NETTO, S. BRENA, D. **Inventário florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1997.

PÉLLICO NETTO, S., ORELLANA, E., STEPKA, T. F., LIMA, R., FIGUEIREDO FILHO, A. Comportamento probabilístico dos raios das sextas árvores no método de Prodan e estimativas dos parâmetros dendrométricos para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze nativa. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 517-524, dez. 2012.

PRODAN, M. **Forest biometrics**. Oxford, Pergamon Press, 1968. 447 p.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura Forestal**. San José, Costa Rica: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1997.

PROJETO RADAMBRASIL Folha SC.22 Tocantins; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra Brasil Ministério das Minas e Energia Secretaria Geral. Rio de Janeiro, 1981.

RADOSEVICH, S.R.; OSTERYOUNG, K. (Org.). Principles governing plant-environment interactions. In: WALSTAD, J.B.; KUCH, P.J. **Forest vegetation management for conifer production**. New York: John Wiley & Sons, p.105-156, 1987.

REINEKE, L.H. Perfecting a stand-density index for even- aged forests. **Jornal Agriculture Research**, v. 46, p. 627–638, 1933.

RENCER, A. C. **Methods of multivariate analysis**. 2 ed. (Wiley series in probability and mathematical statistics) Brigham Young University, 1934.

RIBEIRO, M. D. dos S. B.; JORGE, L. A. B.; MISCHAN, M. M.; SANTOS, A. L. dos; BALLARIN, A. W. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de Eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n.1, p. 31-45, jan./mar. 2017.

RIVAS, J. J. C.; GONZALEZ, J. G. A.; AGUIRRE, O. L.; HERNANDEZ, F. J. The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of *Pinus cooperi* Blanco in Durango (Mexico). **European Journal of Forest Research**, v. 124, p. 133-142, Jun. 2005.

ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. **Canadian Journal Forest Research**, v. 27, p. 890-902, 1997.

ROUVINEN, S.; KUULUVAINEN, T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. **Canadian Journal Forest Research**, v. 27, p. 890-902, 1997.

SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; CORTE, A.P.D.; FERNANDES, L.A.V. **Inventários florestais: planejamento e execução**. Curitiba: UFPR, 2006.

SEMADES. Reformulação da política estadual de florestas e elaboração do plano estadual de florestas do Tocantins (PEF/TO). Palmas: Governo do Tocantins, 2014. Relatório Técnico.

SEPLAN. Atlas do Tocantins: Subsídios ao Planejamento da Gestão Territorial. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública. Diretoria de Zoneamento Ecológico-econômico. Palmas, TO. 2012.

SILVA JÚNIOR, J. L. C. da. **Avaliação parcial das condições pluviométricas no Estado do Tocantins, durante o período chuvoso 2015/2016**. Palmas: Fundação Universidade do Tocantins Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação Núcleo Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2016. Relatório Técnico.

SPURR, S. H. A measure of point density. **Forest Science**, v. 8, p. 85–96, 1962

STAEBLER, G. R. **Growth and spacing in an even-aged stand of Douglas fir**. p.46. PhD Thise thesis, University of Michigan, 1951.

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA Forest Service: Research Paper INT-137. Jun. 1973.

STAPE, J. L. **Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; MICHAEL G. RYAN, M. G.; FONSECA, S. LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. de A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L. G.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1684–1694, Abr. 2010.

STAPE, J. L.; D BINKLEY, D. Insights from full-rotation Nelder spacing trials with Eucalyptus in São Paulo, Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Africa do Sul, v.72, p. 91-98, Set. 2010.

TENZIN, J; TENZIN, K; HASENAUER, H. Individual tree basal area increment models for broadleaved forests in Bhutan. **Forestry**, Oxford, v. 90, p. 367-380, mai. 2017.

TÉO, S. J; SCHNEIDER, C. R; FIORENTIN, L. D; COSTA, R. H. da. Comparação de métodos de amostragem em fragmentos de Floresta Ombrófila Mista, em Leblon Régis, SC. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 44, n. 3, p. 3. 93 - 402, jul. / set. 2014.

TEODORO, J. V. **Avaliações multivariada, geoestatística e de medidas repetidas e um experimento sob delineamento sistemático tipo “leque”**. 110 f. Tese (Doutorado em ciências) – Estatística e experimentação agrônômica. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.

TOME, M; BURKHART, A. E. **Modeling Forest Trees and Stands**. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2012.

UHL, E.; BIBER, P.; ULBRICHT, M.; HEYM, M.; HORVÁTH, T.; LAKATOS, F.; GÁL, J.; STEINACKER, L.; TONON, G.; VENTURA, M.; PRETZSCH, H. Analyzing the effect of stand density and site conditions on structure and growth of oak species using

Nelder trials along and environmental gradient: experimental design, evaluation methods, and results. **Forest Ecosystems**. v. 5, p. 2-19, dez. 2015.

VANCLAY, J. K. Experiment designs to evaluate inter- and intra-specific interactions in mixed plantings of forest trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, p. 366-374. Set. 2006.

VANCLAY, J. K.; LAMB, D.; ERSKINE, P. D.; CAMERON, D. M. Spatially explicit competition in a mixed planting of *Araucaria cunninghamii* and *Flindersia brayleyana*. **Annals of Forest Science**, v. 70, n. 6, p. 611-619, 2013.

VETTENRANTA, J. Distance-dependent models for predicting the development of mixed coniferous forests in Finland. **Silva Fennica**, v. 31, pp. 51-72, 1999.

WAGHORN, J. M.; MASON, E. G.; WATT, M. S. Influence of initial stand density and genotype on longitudinal variation in modulus of elasticity for 17-year-old *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 252, 30, p. 67-72, Nov. 2007.

WEBER, P.; BUGMANN, H.; FONTI, P.; RIGLING, A. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam v. 254, p.96-106, Jan.2008.

WEIGELT, A; JOLLIFFE, P. Indices of plant competition. **Journal of Ecology**, v. 91, p. 707–720, Set. 2003.

WEISKITTEL, A. P; DAVID, W. H; JOHN A. KERSHAW, J. A. JR; JEROME K. VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Thomson Digital, Noida, India, 2011.

YANG, T. R.; LAMA, T. Y.; KERSHAW JR, J. A.; Developing relative stand density index for structurally complex mixed species cypress and pine forests. **Forest Ecology and Management**, v. 409, p. 425–433, 2018.

ZANINE, A. de M; SANTOS, E. M. Competição entre espécies de plantas – uma revisão. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v.11, n.1, p. 10-30. 2004.